

卒業論文

金融経済データからの産業連関表を活用した 為替変動の波及効果の分析と可視化

Analysis and Visualization of the Spillover Effects of Exchange
Rate Fluctuations Using Input-Output Tables
from Financial and Economic Data

富山県立大学 工学部 情報システム工学科

2120028 戸田 真聡

指導教員 António Oliveira Nzinga René 講師

提出年月: 令和7年(2025年)2月

目次

図一覧	ii
表一覧	iii
記号一覧	iv
第1章 はじめに	1
§ 1.1 本研究の背景	1
§ 1.2 本研究の目的	2
§ 1.3 本論文の概要	3
第2章 産業連関分析による波及効果	4
§ 2.1 産業連関分析と具体例	4
§ 2.2 産業連関表からの波及効果の導出	6
§ 2.3 三角化によるサプライチェーンの抽出	10
第3章 金融経済変数の影響の見える化	13
§ 3.1 為替変動と日経平均株価の関係	13
§ 3.2 金融経済要因の見える化	16
§ 3.3 産業連関表による為替変動時の産業への影響	19
第4章 提案手法	22
§ 4.1 3D グラフによるサプライチェーン構造の可視化	22
§ 4.2 為替変動の各産業への影響と金融経済変数との相関	24
§ 4.3 提案手法のアルゴリズム	28
第5章 数値実験並びに考察	32
§ 5.1 数値実験の概要	32
§ 5.2 実験結果と考察	33
第6章 おわりに	38
謝辞	39
参考文献	40

図一覧

2.1	産業連関表の構造 [6]	5
2.2	経済波及効果のイメージ図 [7]	8
2.3	バイナリ変数行列 X の一部	13
2.4	三角化後の産業部門の順列の一部	13
3.1	直近 1 年のドル円為替レートの推移	14
3.2	直近 1 年の日経平均株価の推移	14
3.3	コロナショック時のドル円為替レートの推移	15
3.4	コロナショック時の日経平均株価の推移	15
3.5	有向グラフと無向グラフ	17
3.6	因果グラフの例	17
3.7	産業連関図 [17]	18
3.8	ヒートマップ [19]	18
3.9	米ドル建て輸出入比率の推移 [21]	20
3.10	為替の影響の概念図 [21]	20
3.11	1 割円安による各産業への影響 [21]	21
3.12	1 割円安の恩恵と負担 [21]	21
4.1	バイナリ変数行列の一部	23
4.2	可視化に用いた csv 形式のファイル	23
4.3	3D グラフによるサプライチェーンの可視化	24
4.4	産業間の関係の出力例	25
4.5	令和 2 年産業連関表 37 部門の最適な順列	25
4.6	3D グラフによる可視化の流れ	29
4.7	相関分析の流れ	30
5.1	日々の為替データを用いた各産業への影響値	33
5.2	相関分析に用いる為替と株価のデータセット	33
5.3	2015 年の産業連関表を用いた 1 割円安時の各産業への影響	33
5.4	2020 年の産業連関表を用いた 1 割円安時の各産業への影響	33
5.5	為替変動による各産業への影響値の推移	34
5.6	出力されたヒートマップ	35
5.7	輸入価格変動の影響 (一次波及要因)	36
5.8	輸入価格変動の影響 (投入構造要因)	36
5.9	拡大した 3D グラフ	36
5.10	鉄鋼の購入先の一部	36

表一覧

2.1	取引基本表 (概念図) [8]	9
2.2	投入係数表 (概念図) [8]	9
4.1	産業部門と輸出・輸入物価指数の対応表	26
4.2	産業関連データと業種別株価データの統合表	27

記号一覧

以下に本論文において用いられる用語と記号の対応表を示す.

用語	記号
列部門 j が行部門 i から投入した額	x_{ij}
列部門 j の粗付加価値	V_j
列部門 j の国内生産額	X_j
行部門 i の最終需要	F_i
列部門 j の生産物を 1 単位生産するために必要な行部門 i からの投入額	a_{ij}
列部門 j の粗付加価値 V_j を列部門 j の国内生産額 X_j で割った値	v_j
単位行列	I
投入係数行列	A
n 個の産業部門を指す自然数の集合	$N = \{1, \dots, n\}$
n 個の産業部門の順列	$\pi = \{\pi(1), \dots, \pi(n)\}$
産業部門のすべての順列の集合	Π
産業部門が π に従って順列化された投入係数行列	$A(\pi)$
行列 M に対しての下三角部分の要素の合計	$l(M)$
バイナリ変数行列	X
国産品投入係数行列	A_d
輸入品投入係数行列	A_{im}
国産品価格ベクトル	P_d
輸入品価格ベクトル	P_{im}
付加価値率ベクトル	V
ピアソンの積率相関係数	r

はじめに

§ 1.1 本研究の背景

近年、金融工学は計算機の性能向上やデータサイエンス技術の発展とともに急速に進化している。特に顕著な動向の一つとして、1990年代半ばの外国為替証拠金取引の自由化を契機に本格化した外国為替市場の拡大と情報化の進展が挙げられる。

コンピューター技術や情報通信インフラの発達により、市場参入の障壁が大幅に低下した結果、個人投資家を含む市場参加者が急増し、取引規模は飛躍的に拡大した。その影響で、2022年時点における主要通貨間の平均日次取引高は驚異的な7.5兆ドルに達している [1]。これは外国為替市場の流動性がかつてない水準に達していることを示していると言える。

この極めて流動性の高い市場を支える要因の一つとして、銀行などの公的機関が市場関連データや四半期ごとの企業業績データ、消費者信頼感指数、失業率といった各種マクロ経済指標に加え、政治イベントに関するニュース記事やSNSデータなど、多種多様な情報を公開したことが挙げられる [2]。これにより、機関投資家や企業のみならず、個人でもリアルタイムに経済関連データを取得し、分析できる環境が整った。さらに、公的に公開されたデータにとどまらず、新聞記事やSNSの投稿をテキストマイニングによって解析し、人々の感情データを抽出することで、為替変動の予測に活用する研究も進められている。

このような膨大な構造化データおよび非構造化データを、深層学習をはじめとする最先端の機械学習アルゴリズムで処理することにより、従来を大きく上回る精度で市場予測を行うことが可能になりつつあり、そこから自動売買戦略を導き出す試みも活発に進められている。例として、2022年にはグレンジャー因果性分析を用いた市場間分析を行い、MetaTrader5を活用した自動売買を行うシステムの開発が行われた [3]。

しかしながら、市場の変動や関連指標の変化に関する原因の解明や体系的な理解は、依然として十分に進んでいるとはいえない。要因分析に関する研究は長年にわたって行われてきたが、多くは金融政策の影響など個別の事例分析にとどまり、要素間の相互作用や市場全体の流れや影響を総合的に分析するには至っていない。特に、外国為替市場の変動が実体経済へ与える影響については、産業間の波及効果を考慮した包括的な分析が十分に行われていないのが現状である。

経済システムを構成する多様な要素の相互作用や動的な振る舞いをモデル化することは、経済を複雑系として捉える上で本質的な理解を深めるだけでなく、予測精度の向上やリスク管理の支援にも寄与すると考えられる。中でも、産業連関表を活用し、為替変動が各産業へ与える影響を可視化することは、為替の波及効果をより直感的に捉える上で有用である。

そのため、超流動的な外国為替市場のデータと産業連関表を最大限に活用し、為替変動に

よる各産業への影響を分析または可視化することで、経済全体への波及メカニズムを明らかにすることは、金融工学の発展のみならず、政策立案や企業戦略においても極めて重要な課題であると言えるだろう。

§ 1.2 本研究の目的

1.1 節にも述べた通り、金融工学分野の研究は将来予測の分野を中心に近年大きく進展しているものの、経済を構成する多様な要素間の相互作用や因果関係、経済全体の流れや影響を総合的に分析する研究は十分には行われていない。

経済データは、さまざまな要素によって構成されており、それぞれの要素が他の要素に影響を与え、また影響を受けている。このため、個別の要素を単独で分析するだけでは、経済全体の複雑な相互作用を理解することは不可能である。外国為替市場の場合、マクロ経済動向や金利変動、政治リスクといった複数の外部要因が複雑に影響し合いながら為替レートを変動させているが [4]、為替レートの変動は、金融市場だけでなく、実体経済にも広範な影響を及ぼす。特に、輸出入を行う企業にとって為替レートの変動は、直接的なコスト変動を引き起こし、これが業績や経営戦略に大きな影響を与える。為替レートの変動が企業に与える影響は、単に輸出入関連企業だけにとどまらず、他の産業にも波及する可能性がある。例えば、円安が進行すると輸入原材料の価格が上昇し、これが製造業や運輸業などのコスト構造に影響を与える。さらに、これらの影響は下流産業や消費者物価へと連鎖的に広がり、国内経済全体に波及する。こうした影響の広がりを理解することは、企業の戦略的な意思決定や政策の策定にとって非常に重要である。特に、原材料価格や消費者購買力の変化を通じて、国内市場向けの産業にも影響を与えるため、為替レート変動の影響を総合的に把握することが不可欠である。

しかし、従来の研究では、為替変動の影響を特定の産業や指標に限定して分析するものが多く、産業間の相互作用や全体の波及効果を包括的に捉える研究は十分には進んでいない。多くの研究は、為替レートの変動が特定の産業や製品に与える影響に焦点を当てており、経済全体への波及効果や、異なる産業間での影響の連鎖を明確に示すものは少ない。産業間の相互作用を正確に把握するためには、各産業がどの程度の財やサービスを他の産業から購入し、生産活動を行っているかを示す産業連関表を活用することが有効である。この産業連関表を用いることで、ある産業におけるコスト変動が他の産業にどのように波及するのかを定量的に分析できる。

本研究では、産業連関分析を通じて、為替変動がどの産業にどの程度の影響を与えるかを定量的に評価する。また、産業構造の特徴をより簡単に把握することができる産業連関表の三角化を行い、日本における産業構造を分析することで主要なサプライチェーン構造を抽出する。そして産業連関表の三角化を行い得られた産業部門間の相互依存関係を人々が直感的に理解しやすいとされている 3D グラフ・ネットワークを用いて描画し、ユーザーが日本の産業構造を把握しようとすることを支援できるようなシステムの実装を目指す。

また、本研究では従来の産業連関表を活用した為替変動の波及効果を分析する研究で行われていなかった、日々の為替レートをを用いた分析に拡張し、分析を行う。それに加えて金融経済データとともに分析することによって、日本経済の動向を把握を支援することを目的とする。

§ 1.3 本論文の概要

本論文は次のように構成される.

- 第1章** 本研究の背景と目的について述べる. 背景では従来の金融工学研究の歴史と事例について述べ, 目的では産業連関表を活用して為替変動による波及効果の分析, また 3D グラフによるサプライチェーン構造の可視化を行い, 課題に挑むことについて述べる.
- 第2章** 産業連関表の概要, また産業連関表を活用した波及効果の分析方法, 産業連関表の三角化によるサプライチェーンの抽出について述べる
- 第3章** 為替と日経平均株価との関係, 金融経済要因の可視化手法, 為替変動時の各産業への影響を算出した従来研究について述べる.
- 第4章** 産業連関表の三角化によって得られたサプライチェーン構造を 3D グラフで可視化する手法や, 為替変動の各産業への影響の算出方法や金融経済変数との相関分析手法を述べ, 提案手法の全体の流れについて述べる.
- 第5章** 実際の金融経済データを用いて, 第4章で述べた手法で, 為替変動の波及効果の分析, 相関分析, 3D グラフによるサプライチェーン構造の可視化を行い, 考察を行う.
- 第6章** 本論文における前章までの内容をまとめ, 本研究で実現できたことと今後の課題について述べる.

産業連関分析による波及効果

§ 2.1 産業連関分析と具体例

産業連関表は、作成対象年次における国内あるいはある地域内の経済構造を総体的に明らかにするとともに、経済波及効果分析や各種経済指標の基準改定を行うための基礎資料を提供することを目的に作成されていて、一定期間（通常1年間）において、財・サービスが各産業部門間でどのように生産され、販売されたかについて、行列の形で一覧表にとりまとめたものである [5]。

ある1つの産業部門は、他の産業部門から原材料や燃料などを購入し、これを加工して別の財・サービスを生産し、さらにそれを別の産業部門に対して販売する。そして購入した産業部門は、それらを原材料などとして、また別の財・サービスを生産する。このような財・サービスの「購入→生産→販売」という連鎖的なつながりを表したのが産業連関表である。産業連関表の仕組みを利用して、ある産業に新たな需要が発生した場合にどのような形で生産が波及していくのかを計算することができる。

日本では、10府省庁の共同作業による産業連関表を5年ごとに作成されているほか、地域産業連関表、都道府県・市産業連関表、延長産業連関表、国際産業連関表、各種分析用産業連関表など、それぞれの目的に応じた多くの産業連関表が作成され、幅広く利用されている。

産業連関表の構成、特徴について以下に示す [6]。

産業連関表の全体的な構成

図2.1は産業連関表の全体的な構成を示したものである。

表の列見出しには、財・サービスの買い手側の部門が掲げられ、大きく中間需要部門と最終需要部門から成っている。このうち、中間需要部門は、財・サービスの生産部門であり、各部門は生産のために必要な原材料、燃料等のいわゆる中間財の購入（買い手）部門であり、これらを加工（労働、資本等を投入）し生産活動を行っている。また、最終需要部門は、具体的には消費、投資、輸出などで構成され、主として完成品としての消費財、資本財等の買い手である。

一方、表の行見出しには、財・サービスの売り手側の部門が掲げられ、中間投入部門と粗付加価値部門から成っている。このうち、中間投入部門は、中間財としての財・サービスの供給（売り手）部門であり、各部門は、当該部門の財・サービスを各需要に供給している。また、粗付加価値部門は、財・サービスの生産のために必要な労働、資本などの要素費用などで構成される。

産業連関表を利用した分析例には、以下のようなものがある。[9]

1. 経済構造の現状分析（表作成年次の産業構造や経済規模などの分析）

産業連関表には、財・サービスの県内生産額、需要先別販売額（中間需要、消費、投資、移輸出等）および費用構成（中間投入、労働費用、減価償却額等）が、産業部門ごとに詳細に記載されている。これらを係数化することにより、産業間の連結関係、最終需要と生産、移輸出入、付加価値との関係などを把握し、経済構造の特徴を読み取ることが可能となる。

- 経済構造分析

- － 取引基本表による分析
- － 特殊な産業連関表（接続産業連関表、地域間産業連関表）による分析

2. 経済の機能分析

産業連関表から算出される投入係数や逆行列係数などの各種係数により、投資や移輸出などの最終需要の増減が、各財・サービスの生産や移輸入にどのような影響を及ぼすかを計数的に明らかにすることができる。

- 投入係数・逆行列係数による分析

- － 財、サービスの投入割合の変化
- － 影響力係数と感应度係数
- － 生産（粗付加価値、移輸入）誘発額、同誘発係数、同誘発依存度

3. 経済のシミュレーション分析

最終需要と財・サービスの生産水準等の関係を利用し、公共投資やイベント開催などの特定の施策が各産業部門にどのような経済波及効果をもたらすかを分析することができる。そのため、経済についての各種計画や見通しなどを作成する際、客観的資料として利用することができる。

- 各種施策の経済効果

- － 均衡産出高モデル
公共事業、工場立地、イベント開催、観光による経済波及効果など
- － 均衡価格モデル
円高・円安、原油価格の変動による国内価格への影響など
- － 将来予測等の分析・マクロモデル等の利用
将来の経済予測
- － 特定テーマを分析する産業連関表による分析
建設部門分析用産業連関表を使った分析、環境分析用産業連関表を使った炭酸ガス発生量の予測

§ 2.2 産業連関表からの波及効果の導出

2.1 章で紹介したように産業連関表を利用した分析例はいろいろなものがあるが、経済のシミュレーション分析（最終需要と財・サービスの生産水準等の関係を利用し、公共投資や

イベント開催などの特定の施策が各産業部門にどのような経済波及効果をもたらすかの分析)に焦点を当てる。

経済波及効果

ある産業に需要(消費や投資など)が発生したとき、その産業の生産を誘発するとともに、その産業と取引のある他産業にも原材料需要が発生し、さらに他産業に、といったように地域産業全体に次々に波及していくことになる [7]。

- 直接効果

直接効果とは、消費額や投資額のうち、県外から調達された財やサービスを除いた県内生産分のことである。

- 第1次間接効果

第1次間接効果とは、直接効果によって生産が増加した産業で必要となる原材料等を満たすために、新たに発生する生産誘発効果のことである。

- 第2次間接効果

第2次間接効果とは、直接効果と第1次間接効果で増加した雇用者所得のうち消費にまわされた分により、各産業の商品等が消費されて新たに発生する生産誘発効果のことである。

産業連関表を用いて波及効果を導出する際に、必要な2つの係数について以下に示す [8]。

投入係数

「投入係数」とは、各列部門において、1単位の生産を行う際に必要とされる原材料等の単位を示したものであり、取引基本表の中間需要の列部門ごとに、原材料等の投入額を当該列部門の国内生産額で除すことによって得られる係数である。この投入係数を列部門別に一覧表にしたものが「投入係数表」である。

国内経済を単純化し、部門1および部門2だけからなるものと仮定したとき、取引基本表は、表2.1のように表すことができる。ただし、次のバランス式が成り立つものとする。

需給バランス式(総需要と総供給の均衡)

$$\begin{cases} x_{11} + x_{12} + F_1 = X_1 \\ x_{21} + x_{22} + F_2 = X_2 \end{cases} \quad (2.1)$$

収支バランス式

$$\begin{cases} x_{11} + x_{21} + V_1 = X_1 \\ x_{12} + x_{22} + V_2 = X_2 \end{cases} \quad (2.2)$$

ここで、[列] 部門1が[行] 部門1から投入した額 x_{11} を[列] 部門1の国内生産額 X_1 で除した値を a_{11} とすれば、 a_{11} は[列] 部門1の生産物を1単位生産するために必要な[行] 部門1からの投入額を表している。

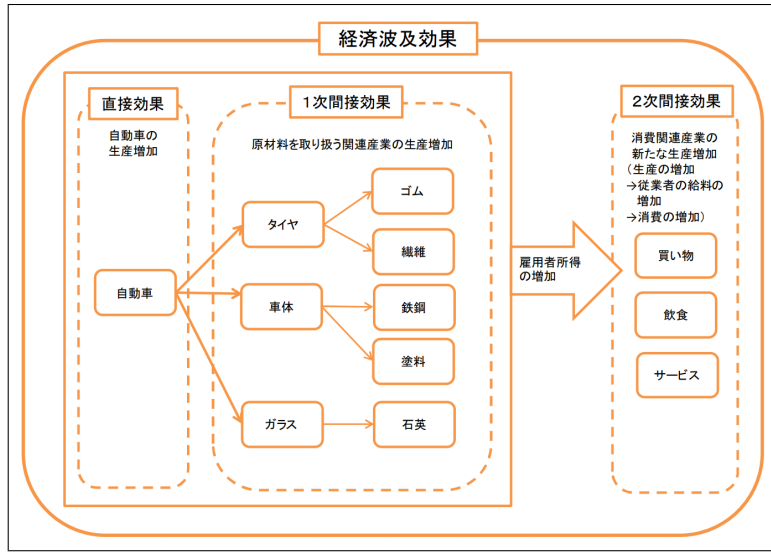


図 2.2: 経済波及効果のイメージ図 [7]

$$a_{11} = x_{11}/X_1 \quad (2.3)$$

中間投入と同様に、〔列〕部門 1 の粗付加価値 V_1 をその国内生産額で除して、 $v_1 = \frac{V_1}{X_1}$ と定義できる。以上の計算を〔列〕部門 2 についても同様に行うことで、表 2.2 のような投入係数表を求めることができる。

式 (2.3) と同様に a_{21} , a_{12} , a_{22} を計算して式 (2.1) に代入して変形すると、次のような式になる。

$$\begin{cases} a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + F_1 = X_1 \\ a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + F_2 = X_2 \end{cases} \quad (2.4)$$

式 (2.4) を行列表記すると、次のようになる。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

このとき

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = [A] \quad (2.6)$$

を投入係数行列という。

ある部門に対する需要の増加は、その部門が生産を行うに当たって原材料、燃料等を各部門から投入する必要があるため、その部門だけではなく他の部門の生産にも影響を及ぼし、

表 2.2: 投入係数表 (概念図) [8]

	〔列〕 部門 1	〔列〕 部門 2
〔行〕 部門 1	a_{11}	a_{12}
〔行〕 部門 2	a_{21}	a_{22}
粗付加価値	v_1	v_2
国内生産額	1.0	1.0

表 2.1: 取引基本表 (概念図) [8]

	〔列〕 部門 1	〔列〕 部門 2	最終需要	国内 生産額
〔行〕 部門 1	x_{11}	x_{12}	F_1	X_1
〔行〕 部門 2	x_{21}	x_{22}	F_2	X_2
粗付加価値	V_1	V_2		
国内生産額	X_1	X_2		

それがまた自部門に対する需要となって返ってくるという生産波及効果をもたらす。式 (2.4) は、このような生産波及効果の累積結果を計算し得る仕組みを示したものであり、投入係数を基礎とする産業連関分析の基本となる考え方である。しかし、この考え方には、「投入係数の安定性」という前提が置かれていることが重要である。

投入係数の安定性

1. 生産技術水準の不変性

産業連関分析においては、投入係数によって表される各財・サービスの生産に必要な原材料、燃料等の投入比率は、分析の対象年次と作表の対象年次の間において大きな変化がないという前提が置かれている。

2. 生産規模に関する一定性

産業連関分析においては、各部門に格付けされた企業、事業所の生産規模は、分析の対象年次と作表の対象年次の間において大きな変化がないという前提が置かれている。

逆行列係数

先ほど述べたような国内経済を単純化した 2 部門の場合であれば計算も容易であるが、実際の部門数は、統合中分類の場合でも 107 あり、その都度式 (2.4) のような連立方程式を解くことは現実的ではない。そこで、もし、ある部門に対する最終需要が 1 単位生じた場合、各部門に対してどのような生産波及が生じ、部門別の国内生産額が最終的にはどれだけになるかを、あらかじめ計算しておくことができれば、分析を行う上で非常に便利である。このとき作成されるのが「逆行列係数表」である。

式 (2.5) の行列表示において

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = [A] \quad \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = [X] \quad \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = [F]$$

とすると、

$$AX + F = X \quad (2.7)$$

となる. これを X について解くと,

$$X - AX = F$$

$$(I - A)X = F$$

$$\therefore X = [I - A]^{-1}F \quad (2.8)$$

となる.

ここで I は単位行列, $(I - A)^{-1}$ は $(I - A)$ の逆行列であり,

$$(I - A)^{-1} = \begin{bmatrix} 1 - a_{11} & -a_{12} \\ -a_{21} & 1 - a_{22} \end{bmatrix}^{-1} \quad (2.9)$$

この行列の成分のことを「逆行列係数」という. これを一つの表にまとめたものが, 「逆行列係数表」であり, 各部門に対する 1 単位の需要増があった場合, 究極的に, どの部門の生産がどれだけ誘発されるかを示すものである. 逆行列係数を一度計算しておけば, 式 (2.4) の連立方程式をその都度解く必要はなく, ある部門に対する最終需要を与えれば, その最終需要に対応する各部門の国内生産額を計算することが可能となる.

§ 2.3 三角化によるサプライチェーンの抽出

公表されている産業連関表は, 第 1 次産業から第 3 次産業の順で産業が任意に配列されていて, これらの間の取引データが記載されている. 産業の並べ方には特に決まりはなく, 任意に配列された産業連関表の取引構造は複雑で, 産業連関表を見ただけでは産業構造の特徴を把握することは非常に困難である. そのため, 産業構造の特徴をより簡単に把握するため, 三角化という手法を用いて産業連関表の再構成を行う.

産業連関表の三角化とは, 産業連関表の配列を最終財産業, 中間財産業, 基礎素材産業の順で並べ替え, 産業連関表の対角線下に取引を集めるようにする手法である [10]. 産業連関表に三角化を適用すると, 複雑に絡み合った産業取引構造から主要なサプライチェーン構造を抽出することができる [11]. サプライチェーンは, 原料から製造過程を通じて最終消費者に向かうまでの一連のプロセスのことをいい, 三角化を用いてこのようなサプライチェーン構造を抽出することにより, 産業の性質や経済構造の変化の分析に役立てている.

産業連関表の三角化による産業構造分析はこれまで多くの研究が行われてきた. 呂らの研究では, アジア国際産業連関表によるアジア地域の経済分析の 1 つの手法として, 産業連関表の三角化によるハイアラーキー性分析を行っている [12]. この研究では, 1995 年表と 2000 年表との違いに注目し, 3 つの国を抽出してこれらを 1 つの地域とみなした場合の産業のハイアラーキー性 (原初的な部門から最終的な部門にいたるまでの産業部門間の階層性) の分析を実施している.

三角化の手法

これまでに開発された三角化の手法について以下に示す [13].

産業連関表の三角化は、部門を並べ替えて下三角部分の要素の合計を最大化する最適化問題として定義されている。これは、NP 困難問題として知られる組み合わせ最適化問題であり、解決が困難である。 n の値が非常に小さい場合、部門の $n!$ 個の並べ替えをすべて列挙し、その中から最適なソリューションを選択すると、問題を簡単に解決することができる。たとえば、 $n = 5$ の場合、 $n! = 120$ 個の並べ替えを列挙し、最適なソリューションを選択することで、問題を解くことが可能である。しかし、このようなブルートフォースアルゴリズムは、 n の値が非常に小さい場合にのみ機能し、 $n = 50$ などの中程度の部門数の場合、部門の $n!$ 個の並べ替えをすべて列挙し、その中から最適なソリューションを選択することは困難である。

産業連関表の三角化に特化したアルゴリズムがいくつか開発され、文献で提案されている。その一つとして、リングシフト順列と呼ばれる産業部門の置換を繰り返すヒューリスティックアルゴリズムが開発されている。ただし、これらのアルゴリズムを実行しても必ずしも最適解が得られるとは限らない。また、中規模サイズの問題の最適解を見つけることができるアルゴリズムとしてリングシフト順列のないアルゴリズムが開発された。産業連関表の三角化は線形順序付け問題と同等であり、オペレーションズ リサーチの文献では、最適解を生成するためのより効率的なアルゴリズムが提案されている。

産業連関表の三角化は、整数計画問題として表現できるため、現在利用可能なソフトウェアに実装されている整数計画問題用の汎用アルゴリズムによって、少なくとも近似的に解決できる。汎用アルゴリズムのほとんどは、特殊アルゴリズムよりも効率が悪いが、汎用アルゴリズムは特殊アルゴリズムとは異なり、制約条件の追加や目的関数の変更など、元の問題が拡張または修正された場合でも適用することが可能である。

整数計画問題による定式化

近藤はいくつかの文献に従って、産業連関表の三角化の定式化を行った [13]。ここでは、その内容についてまとめ、最後に定式化された整数計画問題を解くことによって産業連関表の三角化を行い、得られた結果を載せる。

n 個の産業部門があり、部門間の相互依存関係を表す $n \times n$ の投入係数行列 $A = (A_{ij})$ を三角化することが目標である。

n 個の産業部門を指す自然数の集合を $N = \{1, \dots, n\}$ と定義する。次に、 n 個の産業部門の順列を $\pi = (\pi(1), \dots, \pi(n))$ で表し、産業部門のすべての順列の集合を Π で表す。

任意の順列 $\pi \in \Pi$ が与えられた場合、 $A(\pi) = (A_{ij}(\pi))$ は、産業部門が π に従って順列化された投入係数行列を表す。これは次のように記述される。

$$A_{ij}(\pi) = A_{\pi(i)\pi(j)} \quad (i, j \in N) \quad (2.10)$$

産業連関表の三角化は、組み合わせ最適化問題として定式化される。

$$\begin{aligned} & \text{maximize } l(A(\pi)) \\ & \text{subject to } \pi \in \Pi \end{aligned} \quad (2.11)$$

ここで, $l(M) = \sum_{i>j} M_{ij}$ は, 任意の $n \times n$ 行列 $M = (M_{ij})$ に対して, 下三角部分の要素の合計を示す.

次のような $n \times n$ のバイナリ変数行列 $X = (X_{ij})$ を導入する.

$$X_{ij} = 1 \quad \{\pi^{-1}(i) \geq \pi^{-1}(j)\} \quad (i, j \in N) \quad (2.12)$$

ここで, $1\{\cdot\}$ は, 命題 P が真である場合に $1\{P\} = 1$, そうでない場合は $1\{P\} = 0$ となるような指示関数である. 順列 π が与えられた場合, $\pi(p)$ は p 番目の位置にある部門を表し, $\pi^{-1}(s)$ は部門 s が配置されている位置を表す. ここで, 「部門 s 」は元の順序で s 番目の部門を指す.

$X_{ii} = 1$ は $i \in N$ のいずれに対しても成り立ち, 部門 j が順列 π で部門 i に先行する場合は $X_{ij} = 1$, それ以外の場合は $X_{ij} = 0$ となる. 言い換えれば, $X_{ij} = 1$ の場合, A_{ij} は $A(\pi)$ の下三角部分または主対角線上に位置する. したがって, 次の等式が成り立つ.

$$l(A(\pi)) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_{ij} X_{ij} - \sum_{i=1}^n A_{ii} \quad (2.13)$$

式 (2.10) で述べた産業連関表の三角化は, 次の整数計画問題として表現可能である.

$$\begin{aligned} & \text{maximize} \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_{ij} X_{ij} - \sum_{i=1}^n A_{ii} \\ & \text{subject to} \\ & \quad X_{ii} = 1 \quad (i \in N), \\ & \quad X_{ij} + X_{ji} = 1 \quad (i < j; i, j \in N), \\ & \quad 0 \leq X_{ij} + X_{jk} - X_{ik} \leq 1 \quad (i < j < k; i, j, k \in N), \\ & \quad X_{ij} \in \{0, 1\} \quad (i, j \in N). \end{aligned} \quad (2.14)$$

または, 次の整数計画問題として表すこともできる.

$$\begin{aligned} & \text{maximize} \quad \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n ((A_{ij} - A_{ji})X_{ij} + A_{ji}) \\ & \text{subject to} \\ & \quad 0 \leq X_{ij} + X_{jk} - X_{ik} \leq 1 \quad (i < j < k; i, j, k \in N), \\ & \quad X_{ij} \in \{0, 1\} \quad (i < j; i, j \in N). \end{aligned} \quad (2.15)$$

式 (2.15) は 0-1 整数計画問題であり, $\frac{n(n-1)}{2}$ バイナリ変数と $\frac{n(n-1)(n-2)}{3}$ 不等式制約を持つ.

式 (2.15) の目的関数は, A_{ij} と A_{ji} の値を比べて, 部門 i と部門 j の上下関係を決め, 制約条件は, 産業部門を最適な順列に並び直す際に, 同じ順位の産業部門が存在しないようにするためのものである.

式 (2.15) に対して最適解が得られた場合, 対応する最適な順列 π は次の式で導出できる.

1	1	0	0	1	0	0	0	1	1
0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
1	1	1	0	1	0	0	0	1	1
1	1	1	1	1	0	0	0	1	1
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	1	0	0	1	0	0	0	1	1
0	1	0	0	1	0	0	0	0	1

図 2.3: バイナリ変数行列 X の一部

Sector	Rank
32 なめし革・毛皮・同製品	1
97 飲食店	2
5 漁業	3
46 特殊産業機械	4
52 民生用電気機器	5
54 電子計算機・同付属装置	6
62 精密機械	7
67 その他の土木建設	8
98 宿泊業	9
57 乗用車	10

図 2.4: 三角化後の産業部門の順列の一部

$$\pi^{-1}(i) = \sum_{j=1}^n X_{ij} \quad (i \in N) \quad (2.16)$$

ここで, $X_{ii} = 1$ ($i \in N$) および $X_{ji} = 1 - X_{ij}$ ($i < j$; $i, j \in N$) である.

図 2.5 は, 平成 7-12-17 年接続産業連関表の平成 17 年 102 部門の投入係数行列に対して, 式 (2.15) による三角化を行い得られたバイナリ変数行列 X の一部である. 図 2.6 は, 得られたバイナリ変数行列に対して, 式 (2.16) を用いて導出した最適な順列の一部である.

個人サービス部門（宿泊業, 飲食店など）と最終製品製造部門（機械, 電気機器など）が産業部門の順列の上位に位置している. これらの産業部門の製品やサービスは, 主に最終需要部門によって購入されているので, サプライチェーンの下流に位置している. 最終需要部門とは, 最終消費者またはエンドユーザーによる需要を指す部門のことを指し, 生産された製品やサービスを最終的に消費, 利用, または投資として購入する役割を担う.

金融経済変数の影響の見える化

§ 3.1 為替変動と日経平均株価の関係

株価と為替は密接に関係していて 相互作用がたびたび観察され、為替の動きが株価に影響を与える場合もあれば、逆に株価の動きが為替に影響を与えることもある [14].

為替とは、異なる通貨同士を交換する取引のことを指し、為替レートとは、異なる国の通貨同士の交換比率を表すものである。

また、円安とは、日本円の価値が他の通貨に対して下がることを指し、1ドルを買うために必要な円の量が増えることをいう。具体的には1ドル=100円から1ドル=120円になったとき円安になったという。

一方、円高とは、日本円の価値が他の通貨に対して上がることを指し、1ドルを買うために必要な円の量が減ることをいう。具体的には1ドル=120円から1ドル=100円になったとき円高になったという。

円安・円高のメリットとデメリット

為替相場は常に変動していて、円安になったり、円高になったりするが、円安・円高それぞれにメリットとデメリットが存在する [15].

- 輸出企業にとってのメリット・デメリット

円安は、自社の製品を輸出することで利益を得ている輸出企業にとってはメリットとなる。輸出企業にとって円安がメリットである理由は、円安になると日本円での売上が増加するからである。売上が増加することは企業の業績にプラスとなるため、株価も上昇しやすくなる。反対に円高になると、輸出企業にとってデメリットとなる。今までと同じ数分の製品を販売しても日本円での売上は減少し、企業の業績もマイナスとなり、株価も下がりやすくなる。

- 輸入企業にとってのメリット・デメリット

円高は、海外から製品を輸入して販売している輸入企業にとってメリットとなる。輸入企業にとって円高がメリットである理由は、日本に輸入するためのコストが減少するからである。輸入コストの削減も企業の業績にとってはプラスに働くため、株価も上昇しやすくなる。反対に円安になると輸入企業にとってデメリットとなる。今までと同じ数分の製品を輸入してもコストが増加することになるため、企業の業績はマイナスとなり、株価も下がりやすくなる。

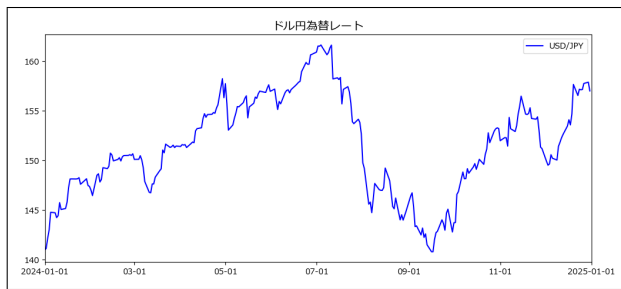


図 3.1: 直近 1 年のドル円為替レートの推移

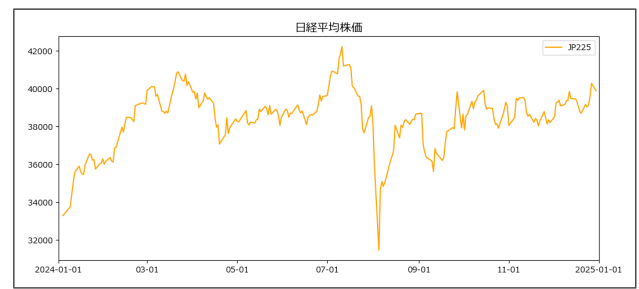


図 3.2: 直近 1 年の日経平均株価の推移

為替変動時に日経平均株価が変動する理由

先ほど述べたように円安・円高は企業の種類によって、メリットにもデメリットにもなるが、一般的には自国の通貨の価値が高くなるほど、つまり円高になるほど、株価は上昇するものと考えられている。しかし日本では、円高になると市場全体が値下がりし、日経平均株価も下落する傾向にあり、2つの理由が挙げられる [15]。

- 日経平均株価の構成銘柄に輸出企業が多く含まれている

日本の代表的な株価指数が日経平均株価であり、日経平均株価とは、日本経済新聞社が東京証券取引所に上場している銘柄から 225 銘柄を選んでその株価をもとに算出したものである。そのため、日経平均株価は、日本経済の活力を示す指標として捉えることができる。225 の構成銘柄については、毎年 1 回、入れ替えが行われているが、輸出に関わる企業の割合が多くなっているのが特徴で、日本経済を支えているのは、製造業による輸出産業がメインだからである。そのため、構成銘柄に占める輸出企業の割合が大きい日経平均株価は、必然的に円高によるマイナスの影響を受けやすくなる。

- 外国人投資家が日本株を売る

現在、日本の株式市場に参加している投資家の半分以上が、海外の年金基金やヘッジファンドなどの外国人投資家である。外国人投資家のほとんどが、自分の証券口座にドルを入れて取引をすることを指す、ドル建てによる取引を行っているので、日本の株価をドルに換算してチェックしている。具体的には、ある銘柄の株価が 10,000 円であるとき、1 ドル = 100 円であれば、その株価をドルに換算すると 100 ドルである。しかし、為替が変動して 1 ドル = 90 円になると、株価 10,000 円のままであったとしても、ドル建てでは 111.11 ドルに値上がりする。すなわち、ドル建てで見た場合、日本の株式市場が変動していなくても円高になるだけで株価は上がる。このことを為替差益といい、円高になると、外国人投資家は利益を確定させるために日本株の売却を行う。株式が売却されると株価は下がり、連動して日経平均株価も下がる。

日経平均株価変動時に為替が変動する理由

次に、為替相場ではなく、日経平均株価が先に動いた場合について述べる。日経平均株価が先に動き、その後に為替レートが動くのには 2 つの理由が挙げられる [16]。

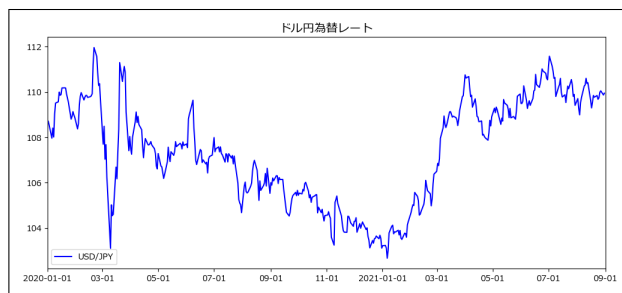


図 3.3: コロナショック時のドル円為替レート
の推移

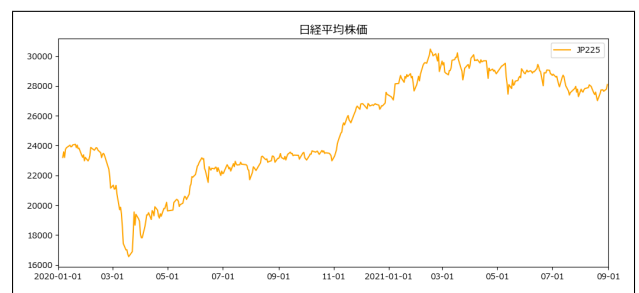


図 3.4: コロナショック時の日経平均株価の
推移

- 外国人投資家による為替リスク回避の行動

外国人投資家が円建ての日本株式に投資を行う際、為替変動リスクを避けるために、将来円を売って外貨を買い戻す、為替予約を締結する。この為替予約は、通常、投資資産の評価額に対して一定の割合を維持する方針が取られる。そのため、日経平均株価が上昇すると、日本株式の評価額が上がり、外国人投資家が保有する円資産の価値も増加する。そして、評価額に基づくヘッジポジションを調整する必要があるため、追加で円を売って外貨を買い戻す為替予約が行われた結果、円安になる。

- リスクオンの際に円安になり、リスクオフの際に円高になるという傾向が確立している

リスクオンとは、投資家がリスクを取って積極的に投資をする状況を指し、リスクオンの相場では株価が上昇する。一方、リスクオフとは、投資家がリスクを避けて安全資産に資金を移す状況を指し、リスクオフの相場では株価が下落する。現在の市場では、リスクオンの際に株価が上昇し、円安になる傾向があり、逆に、リスクオフの際に株価が下落し、円高になる傾向があるため、大衆心理から、株価が上昇すると円が売られ円安になり、株が下落すると円が買われ円高になる。

コロナショック時の相関関係

図 3.1 は、2024 年 1 月 1 日から 2025 年 1 月 1 日までのドル円為替相場のチャートであり、図 3.2 は、同時期の日経平均株価のチャートである。この二つの図を見ると、今まで述べたように日経平均株価とドル円為替相場との間に、正の相関関係があることが確認できる。

図 3.3 は、2020 年 1 月 1 日から 2021 年 9 月 1 日までのドル円為替相場のチャートであり、図 3.4 は、同時期の日経平均株価のチャートである。この二つの図を見ると、2020 年 3 月のコロナショック以降は、日経平均株価は上昇する一方で、ドル円為替相場は下落し、一時的に負の相関関係があることが確認できる。

この背景としては、まず米国の大規模な金融緩和によって市場に大量の資金が供給された。金融緩和とは、中央銀行が金利を引き下げたり、国債や資産を購入することで市場に大量の資金を供給し、経済を刺激しようとする政策のことである。供給された資金が株式に流れ込み、株高を誘発し、日経平均株価は上昇する一方で、金融緩和で供給過多となったドルが価

値を下げ、ドル安が進行し、ドル円為替相場は下落したと考えられる [16]. この負の相関関係は 2020 年 3 月から 12 月まで続き、2021 年以降は再び正の相関関係になっている.

§ 3.2 金融経済要因の見える化

経済は複雑で相互に関連する多くの要素から成り立っているため、その全容を正しく理解することは難しい. 経済活動は、企業間の取引ネットワークや株式持合いのネットワーク、さらには国際貿易などを通じた国と国との結びつきから成り立っている. これらのネットワークは常に動いており、一企業や一国の変化が他の主体にどのように波及していくのかを知ることは重要である.

また、金融システム内における資金の動きも複雑なネットワークを形成しており、システム全体としてのリスク把握は難しいのが現状である. そこで、このような経済活動をネットワークの視点からグラフ理論的に表現する手法として、グラフネットワークが注目され始めた. 最近では新たなデータサイエンスの手法としてグラフネットワークが経済分析に活用されつつある. ここではグラフネットワークに焦点を当て、その経済分析における重要性、具体的な応用例について述べる.

グラフ・ネットワーク

グラフネットワークは、複雑なデータ構造を可視化複数のノードと、それらをつなぐエッジで表現し、これらの要素がどのように作用しているかをネットワークとして視覚化する手法である. グラフ・ネットワークは様々な分野で使用されており、分野によって異なる種類が使われることになる.

そのうちの 1 つは無向ネットワークであり、これは人間関係や道路などを表すときに用いられる. 無向ネットワークの特徴として、エッジに方向がないというものがある. そのため、無向グラフは相互に関連する要素が互いに同程度の影響を持つ場合に使われることが多い. また、もう 1 つ重要なネットワークとして有向グラフというものがある. 有向グラフは無向グラフと異なり、エッジに方向を持っている. そのため、因果関係や確率関係などを描画するときに非常に有用であり、様々な分野で注目を集めている. 無向グラフと有向グラフの簡単な例を図 3.5 に示す. また、重み付きグラフというものもある. 重み付きグラフは影響の大きさを表す値をラベルとしてエッジに付与する. 有向グラフに重みをつけたグラフの例として因果グラフがある. 因果グラフの簡単な例を図 3.6 に示す. また、ネットワークには巡回ネットワークと非巡回ネットワークが存在し、巡回ネットワークでは特定のノードから出発して他のノードを経由し、最初のノードに戻れるような閉回路になっている. 逆に非巡回ネットワークでは特定のノードから出発して他のノードに到達する経路が一方方向のみで巡回しない形式になっている.

経済への応用

グラフネットワークの経済分析への応用例として、産業連関図の構築がある. グラフネットワークを用いて産業連関図を構築することで、異なる産業や企業の相互の依存関係を可視化することができる. 例えば、自動車産業が鋼鉄産業に依存している場合、これをエッジ

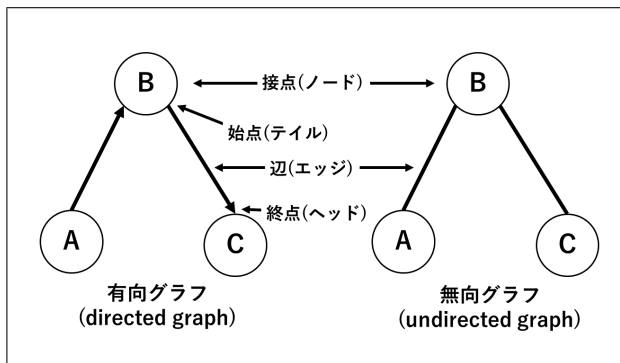


図 3.5: 有向グラフと無向グラフ

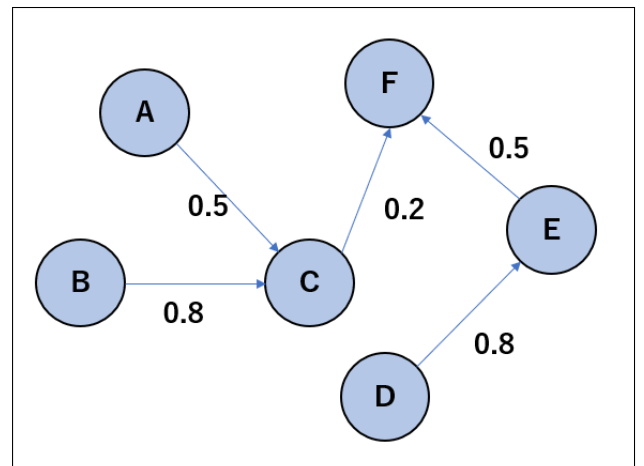


図 3.6: 因果グラフの例

で結ぶことで製造業界全体のリスクや変動を理解する手助けとなる。これにより、サプライチェーン全体の複雑な構造を理解し、リスクヘッジの方針を検討することができる [23]。産業連関図のイメージを図 3.7 に示す。経済波及効果の計算は、図で示した産業間取引ネットワークの重みを 1 単位あたりの生産に必要な投入量に置き換えたネットワークの無限長パスを計算することに対応する。

他の例として、国際経済のネットワーク分析がある。グラフネットワークを用いて国家や地域の経済的な相互関係を分析することで、国際経済のネットワークがどのように形成されているかを理解できる。国際貿易、外国直接投資、金融取引などの要素をノードとして結び、これらのエッジを通じて国家間の経済的な相互依存関係を可視化する。これは、グローバルな金融危機や貿易紛争の影響評価において役立つことがある。

また、金融市場の相関関係の解明についてグラフネットワークを用いたものもある。グラフネットワークを用いて金融市場内の企業、投資家、資産クラスの関係性を分析することで、市場の相関関係やリスク伝播のメカニズムを理解することができる。企業の財務データや市場指標がノードとなり、これらのエッジが相関や取引の関係を示すことで、市場の変動がどのようにして異なる要因に影響を与えるかを分析する。これにより、ポートフォリオの構築やリスク管理の向上が期待される。

また、企業間取引ネットワークというものもあり、これではノードを個々の企業、エッジを企業間の取引量や金額など取引関係の強弱を表し、エッジの方向は調達企業から納入企業に向かう線で表す。これは要するに有向グラフネットワークであり、このネットワークから特定企業への取引依存度や重要顧客企業、重要納入企業などを分析することができる。実際の取引データから構築することで、企業の業界内外での立場や影響力を可視化することができ、産業分析の際には非常に重要になってくる。

Three.js

Three.js はウェブブラウザ上で 3 次元コンピュータグラフィックスを描画するための JavaScript ライブラリである。HTML5 の規格に従っており、プラグイ

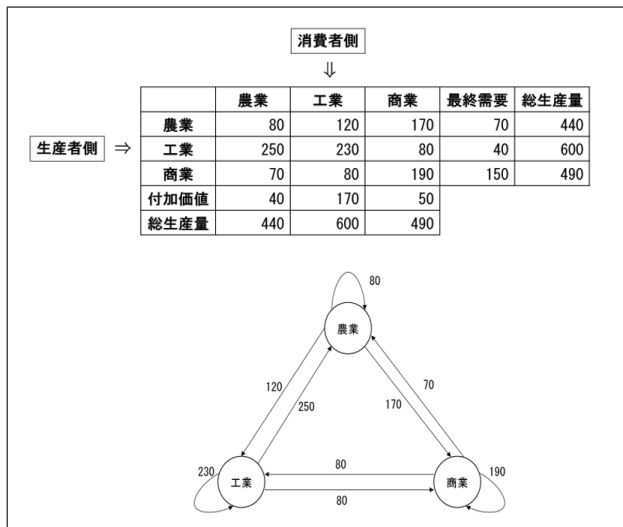


図 3.7: 産業関連図 [17]

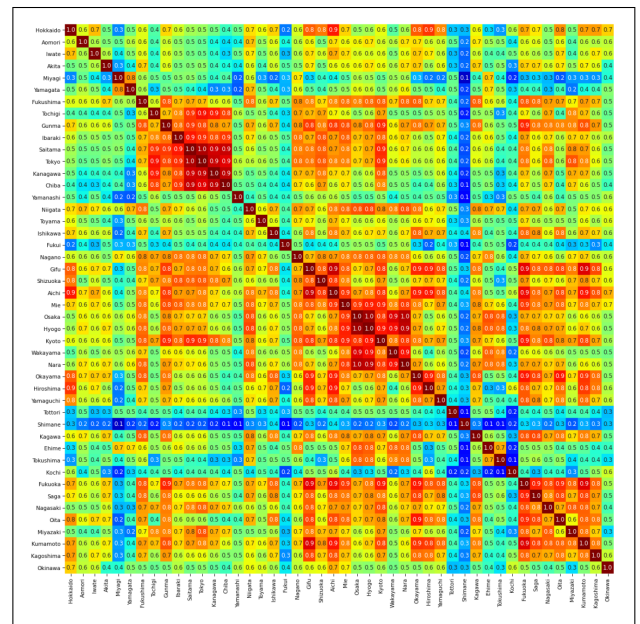


図 3.8: ヒートマップ [19]

ン不要で利用することができる。また、WebGL という 3D グラフィックス API をラッピングしており、簡素なコードで 3DCG を描画することができる。

描画には”3D Force-Directed Graph”というモジュールを用いており、Json ファイルでデータを与えることで、有向グラフを作成することができる。

3次元コンピュータグラフィックスとは、3次元の立体的な仮想物体を、コンピュータで演算することで平面上に奥行きや質感のある画像を表す手法である。従来は大型計算機が必要であったが、プロセッサの性能向上とGPUの一般化により、物性シミュレーションや3Dゲームなど、さまざまな分野で利用されている [20]。

ヒートマップ

ヒートマップはデータの意味や関連性を可視化するために、数値の大小関係を視覚的に表現することを目的に、複数の色の濃淡を使って可視化する手法であり、従来から気温の分布を可視化するなどに使われている [18]。現在では様々な分野において、データの集中度を濃淡のある色で表現する方法として活用されていて、相関行列を可視化する方法として、ヒートマップがよく使用される。

小松の研究では、インターネット上に公開されている COVID-19（新型コロナウイルス）に関するオープンデータに関して、相関分析とクラスター分析を行い、日本の全都道府県、日本を含むアジア諸国、およびヨーロッパ諸国の新規感染者数の日次データを各々時系列データと捉え、地域間の相関係数を算出し、その値をヒートマップとして表示することによって、さまざまな知見を得ていた [19]。

§ 3.3 産業連関表による為替変動時の産業への影響

産業連関表を利用した分析例は、経済構造の現状分析や経済の機能分析、経済のシミュレーション分析など様々なものがある。

日本経済研究センターの小野寺らの研究では、産業連関表を縦方向にみた、費用構成を中心とした収支バランスに基づく均衡価格モデルと呼ばれる分析手法を用いて、対ドル円相場が10%円安に動き、各産業の輸出入価格が米ドル建て契約の割合だけ上昇した場合、各産業に及ぼす影響を産業間の投入産出構造を表す総務相「産業連関表」(2000年、2005年、2015年の3時点)を用いて試算した [21]。

円安の効果

円安の効果は大きく分けると3つある [22]。

- 価格効果

外貨建てで取引されている輸出入品について、円安はそれらの製品の円建て価格を押し上げる効果がある。数量効果や金融効果と比べればラグが小さく、また、輸出価格の押し上げは企業にとってプラスに働く一方で、輸入価格の押し上げはコストを増やす要因としてマイナスに働くことから、その影響は両者の大小関係に左右され、効果が定まっていない。

- 数量効果

価格効果によって得られる利益を原資に企業が輸出品の外貨建て価格を引き下げること、輸出数量が押し上げられる効果がある。販売価格引き下げの効果が生じるとしても、同業他社との競合の結果として得られるものであり、ある程度の時間を要するとみられる。

- 金融効果

海外からの配当等の金融収入額について、円安はその円建て評価額を押し上げる効果がある。海外からの配当等の金融収入の増加分が、貸金や配当、設備投資の増加等の形で国内に波及するには、ある程度の時間が必要と考えられる。

小野寺らの研究では、円安による価格変動の直接の影響のみを検討し、価格変動による輸出入や国内需要の数量の変化や金融効果については考慮していない。

以下は小野寺らの研究についてまとめたものである [21]。

波及効果の違いを生み出す要因

小野寺らの研究の分析の枠組みでは、為替が円安に動いた時の各産業への波及効果の違いを生み出す要因は2つある。1つは各産業の輸出価格と輸入価格がどの程度上昇するか、もう一つは各産業において値上がりした輸入財、およびその輸入財を使って生産された財をどの程度投入しているか、という投入構造であり、そうした財を多く投入する産業では円安のコストが大きくなる。

輸出	2000年	2005年	2015年	輸入	2000年	2005年	2015年
繊維品	88.2	72.7	79.8	食料品・飼料	76.2	69.7	60.9
化学製品	89.6	74.7	70.5	繊維品	71.0	49.3	40.1
金属・同製品	82.8	83.4	77.4	金属・同製品	83.6	83.2	86.1
一般機器	32.1	32.1	27.7	木材・同製品	100.0	80.1	79.7
電気機器	64.4	53.8	55.6	石油・石炭・天然ガス	100.0	99.7	91.3
輸送用機器	52.1	49.6	48.3	化学製品	63.8	52.4	36.4
輸出計	59.6	53.0	53.3	機械器具	59.3	57.1	59.5
				輸入計	75.6	71.1	71.3

図 3.9: 米ドル建て輸出入比率の推移 [21]

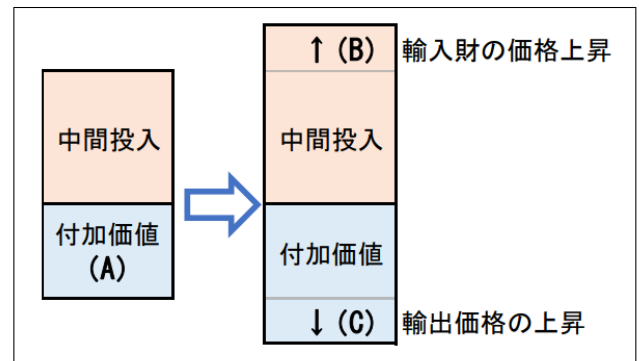


図 3.10: 為替の影響の概念図 [21]

為替から各産業の輸出入価格への波及

1つ目の波及要因に関しては、対ドル円相場が円安に動いた時に、各産業の輸出入価格が米ドル建て契約の割合だけ上昇すると想定する。たとえば、ある産業の輸出の米ドル建て契約比率が6割であれば、10%の円安・ドル高によって輸出価格は6%上昇する。

米ドル建て契約の比率は、日本銀行「輸出・輸入物価指数の契約通貨別構成比」の品目別ドル建て比率を使った。主な品目の米ドル建て輸出入比率の推移を図3.9に示す。これらの比率を使って各年の10%円安による各産業の輸出入価格の上昇率を想定し、それを産業連関表と組み合わせて影響を計算する。

輸入価格変動の影響

輸入価格から国内価格への波及は、輸入品の投入価格の上昇による国産品の価格上昇がさらに他産業へ波及していく完全波及の場合を計算した。非競争輸入型産業連関表で、国産品投入係数行列を A_d 、輸入品投入係数行列を A_{im} とすると、国産品価格ベクトル P_d 、輸入品価格ベクトル P_{im} 、付加価値率ベクトル V との間には、以下の関係が成り立つ。

$$P_d = A'_d \cdot P_d + A'_{im} \cdot P_{im} + V \quad (3.1)$$

式 (3.1) から

$$\Delta P_d = (I - A'_d)^{-1} \cdot A'_{im} \cdot \Delta P_{im} \quad (3.2)$$

として、輸入価格上昇による国内価格の押し上げ効果を計算した。これらは、コストを増やし付加価値率を圧迫するため、図3.11、図3.12ではマイナスとした。輸入価格変動による各産業の影響は図3.10の(B)/(A)に相当する。

輸入価格の上昇は直接的なコスト増（一次波及要因）と、企業間の取引を通じて国内価格に転嫁される間接的なコスト増（投入構造要因）の2つの要因で捉えることができる。(3.2)式より、一次波及要因を次の式とし、

$$\Delta P_d = A'_{im} \cdot \Delta P_{im} \quad (3.3)$$

投入構造要因は (3.2) 式から (3.3) 式を引いたものとする。

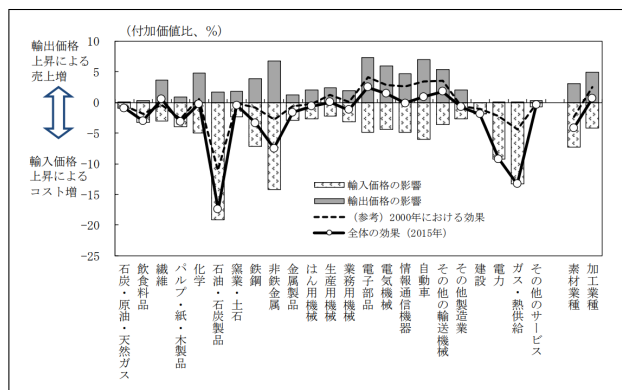


図 3.11: 1 割円安による各産業への影響 [21]

輸出価格変動の影響

輸出価格の上昇は、各産業の輸出額を増加させることで、付加価値額を押し上げる効果を持つ。各産業への効果は、以下の式によって算出した。図 3.10 の (C)/(A) に相当する。

$$\text{輸出価格上昇率} \times \frac{\text{輸出額}}{\text{付加価値額}} \quad (3.4)$$

分析結果

図 3.11 は、円安の 2 つ目の波及効果である各産業の投入構造を踏まえて、輸出入に与える最終的な効果を図示したものである。

図 3.11 を見ると、2015 年の全体の効果がマイナスとして大きく出ている石油・石炭製品、ガス・熱供給、電力は、いずれも生産に占める輸入原材料の比率が高く、輸入価格の影響を直接受けやすい（一次波及の割合が大きい）産業であることがわかる。これらの産業への円安の影響を 2000 年と比較すると、全体の効果のマイナスが大きくなっている。この要因として、2000 年当時の原油価格が年平均で 1 バレル 30 ドル程度であったものが、2015 年には 50 ドル近くまで上昇したこと、これに加えて 2011 年の東日本大震災の影響から原子力発電所が軒並み稼働を停止し、代替火力に使う LNG などの化石燃料の輸入額がかさんだことがあげられる。

一方、電子部品、自動車などの加工型の製造業では輸出向けの生産が多く、円安の恩恵を受けやすい産業構造となっている。また、電子部品、自動車などの加工型の製造業は、国内からの調達の割合も比較的高いため、全体の効果ではプラスの恩恵があるが、図 3.12 を見ると、全体の効果のプラス幅が徐々に縮小していることがわかる。産業連関表で 2005 年から 2015 年までの輸出額、輸入額の伸びを見ると、加工型の輸出額は年率 0.9 % の伸びにとどまったのに対し、輸入額は年率 4 % 近く伸びている。輸入に比べて輸出が伸び悩んだことで、円安の効果が薄れていることを示している。

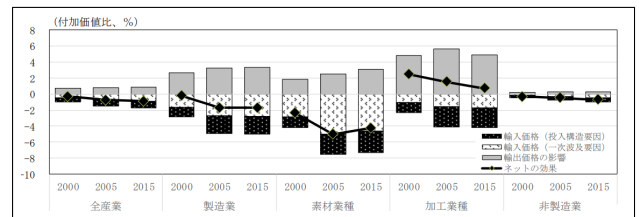


図 3.12: 1 割円安の恩恵と負担 [21]

提案手法

§ 4.1 3D グラフによるサプライチェーン構造の可視化

本研究では産業連関表の三角化によって得られたサプライチェーン構造を可視化することで、利用者が複雑な産業間の相互依存関係を理解しようとすることを支援する。可視化の手法として、ネットワークによるものがある。ネットワークの種類は2次元ネットワークと3次元ネットワークが存在する。

3D グラフによる可視化では、ネットワーク構造を視覚的に理解しやすくすることができることが知られており [23]。また、異常な構造や特異なパターンを素早く発見することができる。また、ネットワークを読み取る所要時間と誤り率から3D グラフの可読性を検証し、3次元可視化が2D 可視化よりも可読性が高かったという結果を得ている研究もある [24]。

そのため、本研究では有向重み付き3D グラフによるサプライチェーン構造の可視化を行うことで、複雑な産業間の相互依存関係を直感的に素早く正確に理解できるようにする。

最初に、産業連関表の投入係数に対して、2.3章で述べた式 (2.15) の整数計画問題を解くことによって、産業連関表の三角化を行う。産業連関表の三角化によって得られたバイナリ変数行列から読み取ることができる、産業間の相互依存関係を csv ファイルに出力し、その csv ファイルから情報を読み取り、自動的に3D ネットワークを作成するシステムを作成した。そのためには、産業連関表の三角化によって得られたバイナリ変数行列から読み取ることができる、産業間の相互依存関係を csv ファイルに格納する必要がある。

バイナリ変数行列のグラフネットワークによる表現

図 4.1 は産業連関表の三角化によって得られるバイナリ変数行列の一部である。図 4.1 を見ると、2 行目の農林漁業と、D 列目の飲食料品が交差するところに変数 1 が入っている。これは、農林漁業部門のほうが飲食料品部門よりもサプライチェーンの上流に位置しているということを意味していて、農林漁業部門が製品やサービスを提供している部門に値し、飲食料品部門が製品やサービスの供給を受けている部門に値する。つまり、農林漁業部門のノードから飲食料品部門のノードに向かってエッジが伸びているとグラフネットワークでは表現できる。また、産業連関表の三角化によって得られるバイナリ変数行列は、ある行列の要素に 1 が入っていたら対角要素には 0 が入っているため、エッジが双方向に向かって伸びていることはなく、非巡回グラフになっている。

産業連関表の三角化によって得られたバイナリ変数行列から読み取ることができる、産業間の相互依存関係を csv ファイルに格納したのが図 4.2 であり、これは製品やサービスを提供している部門のノードを from 列、製品やサービスの供給を受けている部門を to 列、投

	A	B	C	D
1		農林漁業	鉱業	飲食料品
2	農林漁業	1	0	1
3	鉱業	1	1	1
4	飲食料品	0	0	1
5	繊維製品	1	0	1
6	パルプ・紙・木製品	1	0	1
7	化学製品	1	0	1
8	石油・石炭製品	1	0	1
9	プラスチック・ゴム製品	1	0	1
10	窯業・土石製品	1	0	1

図 4.1: バイナリ変数行列の一部

	A	B	C
1	from	to	effect
2	農林漁業	飲食料品	0.1905628
3	農林漁業	教育・研究	0.0013825
4	農林漁業	医療・福祉	0.0019559
5	農林漁業	対個人サービス	0.0165897
6	鉱業	農林漁業	3.10E-05
7	鉱業	飲食料品	0.0001852
8	鉱業	繊維製品	0.0002047
9	鉱業	パルプ・紙・木製品	0.0021791
10	鉱業	化学製品	0.0042466

図 4.2: 可視化に用いた csv 形式のファイル

入係数を effect 列に入れた形式である．この csv ファイルを読み込み，自動的に 3D グラフネットワークを作成する．

Three.js を用いた 3D グラフ作成

3D グラフの作成には Three.js のモジュールである 3D Force-Directed Graph を用いる．3D Force-Directed Graph グラフでは Json ファイルの形式でデータを与えることができる．先ほど作成された産業間の相互依存関係を，ノードの名前と，矢印の元のノードおよび矢印の先のノードを ”nodes ” および ” links ” として与えることでグラフの描画に必要な情報を受け渡す．受け渡された情報をもとにグラフを作成する．ここで，3D Force-Directed Graph の初期設定ではグラフのノードは球体になっており，テキストの表示を行うには適しているとは言えない．そこでノードそのものをテキストにする．また，ユーザーの 3D グラフ内の特定のノードの識別をしやすいとする目的として，マウスカーソルをノードのテキスト上に動かした際にそのノードのテキストサイズを大きくしている．

図 4.3 に提案手法によって作成された有向重み付き 3D グラフを示す．

産業連関表の三角化後のバイナリ変数行列は，行列の中身の数値がすべて 0 か 1 であり，ある産業部門が他の産業部門に供給する製品やサービス，および逆に他の産業部門から供給を受ける製品やサービスの流れについては読み取ることができるが，産業部門間の供給量の違いを読み取ることができない．そこで，産業連関表の三角化後のバイナリ変数行列の中身の数値が 1 のところに，産業連関表の投入係数を入れることによって，ある産業部門の国内生産額に占めるその他の産業部門からの供給の割合を読み取ることができるようにした．なお 3D グラフを見やすくするために，実際の投入係数を 100 倍して小数点第 2 位までの値をエッジに付与した．

また，3D グラフの産業部門名が書かれているノードをクリックすることで，その産業部門からエッジが伸びている産業部門名 (販売先) と，その産業部門へエッジが向かっている産業部門名 (購入先) が，画面上に表示されるようにした．図 4.4 は，3D グラフの教育・研究

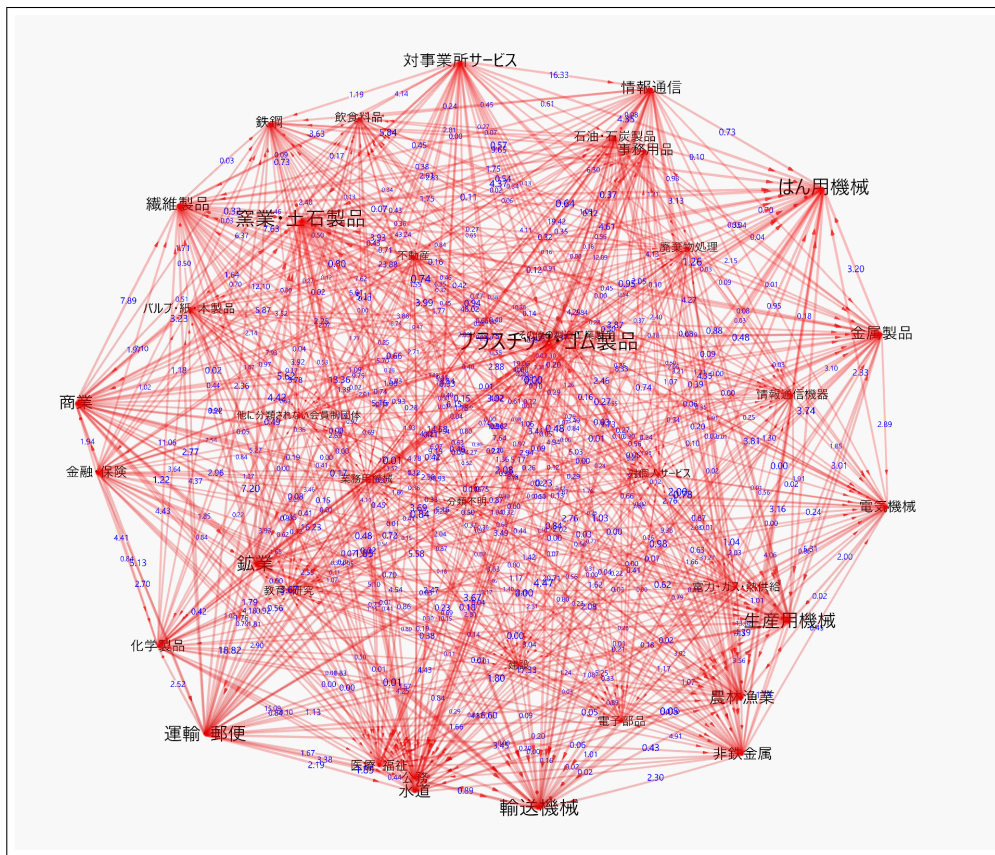


図 4.3: 3D グラフによるサプライチェーンの可視化

部門のノードをクリックした際に画面上に表示される、教育・研究部門とその他の部門間の関係の出力例である。

今回作成した 3D グラフでは、どの産業部門がサプライチェーンの上流に位置し、そこからどのような経路をわたってサプライチェーンの下流に到達するかを一目で把握することが難しかったため、2.3 章で述べた式 (2.16) で導出できる産業の最適な順列が、画面上に表示されるようにした。

図 4.5 は、令和 2 年 (2020 年) 産業連関表の取引基本表 (生産者価格評価) (統合大分類表) の投入係数行列に対して、式 (2.15) による三角化を行い得られたバイナリ変数行列に対して、式 (2.16) を用いて導出した 37 の産業部門の最適な順列を示したものであり、サプライチェーンの下流順に産業部門が並べられている。

§ 4.2 為替変動の各産業への影響と金融経済変数との相関

本研究では、3.3 章で述べた日本経済研究センターの研究 [21] を参考に、現時点で一番最新のデータである 2020 年の総務相「産業連関表」の取引基本表 37 部門を用いて、為替変動時の各産業への影響を算出した。

日本経済研究センターの研究では、ドル円為替レートが 1 割円安に動いたときに各産業に及ぼす影響を算出しているが、本研究では実際のドル円為替レートのデータを用いて、前日

ノード: 教育・研究	
販売先	
生産用機械 (Value: 0.04)	
医療・福祉 (Value: 0.01)	
購入先	
対事業所サービス (Value: 9.75)	
情報通信 (Value: 3.23)	

図 4.4: 産業間の関係の出力例

産業部門名	順列	産業部門名	順列
生産用機械	1	金属製品	20
医療・福祉	2	鉄鋼	21
教育・研究	3	非鉄金属	22
対個人サービス	4	廃棄物処理	23
飲食料品	5	繊維製品	24
農林漁業	6	その他の製造工業製品	25
水道	7	パルプ・紙・木製品	26
他に分類されない会員制団体	8	プラスチック・ゴム製品	27
分類不明	9	化学製品	28
公務	10	電力・ガス・熱供給	29
輸送機械	11	石油・石炭製品	30
情報通信機器	12	鉱業	31
事務用品	13	商業	32
業務用機械	14	運輸・郵便	33
建設	15	不動産	34
はん用機械	16	金融・保険	35
電気機械	17	情報通信	36
電子部品	18	対事業所サービス	37
窯業・土石製品	19		

図 4.5: 令和 2 年産業連関表 37 部門の最適な順列

と当日のドル円為替レートの終値の変動率を求めることによって、前日と当日のドル円為替レートの変動が各産業に及ぼす影響を算出している。

なお本研究では価格変動の直接の影響のみを検討し、価格変動による輸出入や国内需要の数量の変化は考慮しない。また、分析に用いられる投入係数、逆行列係数は、令和 2 年 (2020 年) 産業連関表作成時の状況を表すもので、その状況が続いているものと仮定する。

非競争輸入型への変換

取引基本表に関して、輸入をどのように扱うかについては、大別して二つの方式がある [8]。

- 競争輸入型

同じ種類の商品について、国産品と輸入品との区別を行わず、一括して扱うものとした取引基本表を競争輸入型という。

- 非競争輸入型

同じ種類の商品であっても、国産品と輸入品とを区別して扱うものとした取引基本表を非競争輸入型という。

輸入価格変動の影響を求める際に、国産品投入係数行列 A_d と輸入品投入係数行列 A_{im} を求める必要がある。総務相が公開している産業連関表は競争輸入型であるため、「総務相の令和 2 年 (2020 年) 産業連関表 結果の概要」のページにある、「[参考] 計算シート その 2 輸入係数、輸入品投入係数等に関する表」の大分類のエクセルファイルから輸入表を取得し、元の取引基本表の値から輸入表の値を引くことによって非競争輸入型に変換した。

輸出入価格の変化率

表 4.1: 産業部門と輸出・輸入物価指数の対応表

産業連関表(部門)	輸入物価指数	産業連関表(部門)	輸出物価指数
農林漁業, 飲食料品	飲食料品・食料用農産物(56.2)	繊維製品	繊維品(47.5)
繊維製品	繊維品(36.8)	化学製品	化学製品(56.9)
鉱業, 鉄鋼, 非鉄金属, 金属製品	金属・同製品(79.6)	鉱業, 鉄鋼, 非鉄金属, 金属製品	金属・同製品(79.1)
パルプ・紙・木製品	木材・木製品・林産物(77.1)	はん用機械, 生産用機械, 業務用機械	はん用・生産用・業務用機器(24.8)
電力・ガス・熱供給, 石油・石炭製品	石油・石炭・天然ガス(97.3)	電気機械, 情報通信機器, 電子部品	電気・電子機器(53.6)
化学製品	化学製品(28.1)	輸送機械	輸送用機器(46.5)
はん用機械, 生産用機械, 業務用機械	はん用・生産用・業務用機器(39.3)	窯業・土石製品, その他の製造工業製品	その他産品・製品(55.7)
電気機械, 情報通信機器, 電子部品	電気・電子機器(68.5)	運輸・郵便	外航貨物輸送(90.0)
輸送機械	輸送用機器(37.8)	対個人サービスなど21部門	輸出計(49.2)
窯業・土石製品, その他の製造工業製品	その他産品・製品(62.6)		
運輸・郵便	外航貨物輸送, 外航貨物用船料(97.9)		
対個人サービスなど16部門	輸入計(64.4)		

また輸入価格変動の影響を求める際に輸入品価格ベクトル P_{im} を, 輸出価格変動の影響を求める際に輸出価格の変化率を求める必要がある. 各産業の米ドル建て契約の輸出入額のみが対ドル円為替レートの変動によって影響を受けると仮定し, 「為替の変動率×米ドル建て比率」として求めた.

各産業の米ドル建て契約比率には日本銀行「輸出・輸入物価指数の契約通貨別構成比」の2023年12月の値を用いたが, 部門の内訳が輸出物価指数は7部門, 輸入物価指数は10部門にしか分かれていないので, 産業連関表の37部門には足りない.

そのため簡易的に, 比較的近い部門に対応させて用いた. 具体的にどのように対応させたかを表4.1に示す. 表4.1の()内の数字は米ドル建て比率の値である. 運輸・郵便部門については例外的に, 日本銀行「企業向けサービス価格指数」の関連資料にある, 契約通貨別構成比の表での「外航貨物輸送」および「外航貨物用船料」の米ドル建て比率の単純平均を用いた.

業種別株価とドル円為替レートのデータ収集

業種別株価データとドル円為替レートに関しては, Pythonのライブラリであるyfinanceを用いてデータの収集を行う. yfinanceは, Yahoo Financeから株価や為替, 主要な株式指数などの情報を取得できるPythonライブラリであり, Tickerと呼ばれるモジュールを使って, 株価コードに紐付いた様々な情報にアクセスすることが出来る. 業種別株価データは, 日経500種平均株価の構成銘柄に含まれている企業の株価データを取得し, 業種別に平均をとっている.

日経500種平均株価は東京証券取引所のプライム市場, スタンダード市場およびグロース市場上場企業のうち, 500銘柄を対象に算出され, 225銘柄を対象とした日経平均株価よりも広範囲の銘柄が含まれるため, 市場全体の動きをより広く反映している. 日経500種平均株価の構成銘柄に含まれている企業の株価データをyfinanceを用いて取得するためには, ティッカーシンボルと呼ばれる株式市場で取引される企業を識別するためのコードが必要である. 各企業のティッカーシンボルについては, 日本経済新聞のWebサイトからスクレイピングを行うことで, 自動的に取得している.

業種別株価データの単位は全て日本円である. また, 時間足については業種別株価とドル円為替レートともに日足のデータを取得している.

表 4.2: 産業連関データと業種別株価データの統合表

産業連関表(部門)	株価(業種)	産業連関表(部門)	株価(業種)
農林漁業	水産	鉱業	鉱業
飲食物品	食品	繊維製品	繊維
パルプ・紙・木製品	パルプ・紙	化学製品	化学
石油・石炭製品	石油	プラスチック・ゴム製品	ゴム
窯業・土石製品	窯業	鉄鋼	鉄鋼
非鉄金属、金属製品	非鉄金属製品	はん用機械、生産用機械、業務用機械	機械、精密機器
電気機械、電子部品、情報通信機器	電気機器	輸送機械	輸送用機器、造船、自動車
その他の製造工業製品	その他製造	建設	建設
電力・ガス・熱供給	電力、ガス	商業	商社、小売業
金融・保険	銀行、証券、保険、その他金融	不動産	不動産
運輸・郵便	陸運、海運、空運、鉄道、バス、倉庫	情報通信	通信
医療・福祉	医薬品	対事業所サービス、対個人サービス	サービス

産業連関データと業種別株価データを統合したデータセットの作成

産業連関表による為替変動時の各産業への影響と業種別株価との相関係数を求めるには、産業連関データは 37 部門、株における業種の区分として 36 業種であり、産業連関表における部門の分け方と業種別株価における業種の分け方とで違いがあるため、産業連関データと業種別株価データを統合したデータセットの作成を行う必要がある。例えば、産業連関データの輸送機械部門に対応している業種別株価データの業種は、輸送用機器、造船、自動車などまとめる必要があるものについてはまとめて統合を行い、24 種に統合した。具体的にどのように対応させたかを表 4.2 に示す。

相関分析とヒートマップによる可視化

産業連関表による為替変動時の各産業への影響と業種別株価との相関係数を求めるために作成した産業連関データと業種別株価データを統合したデータセットに対して、ヒートマップによる相関行列の可視化を行った。ヒートマップによる相関行列の可視化を行うことで、データの特定の特性や関係性を一目で直感的に理解することが可能になる。

業種別株価とドル円為替レートとの相関を求めるため、産業連関データと業種別株価データを統合したデータセットにドル円為替レートの終値データを追加した。

産業連関表による為替変動時の各産業への影響は、前日と当日のドル円為替レートの終値の変動率から算出しているため、業種別株価とドル円為替レートについても取得した日足データから、前日と当日のそれぞれのデータの終値の変動率を計算し、その値をデータとして用いている。

相関を求める計算は、ピアソンの積率相関係数で行っている。ピアソンの積率相関係数は、2つの量的変数間の直線的な関連性を評価する際に用いられる統計的手法である [25]。ピアソンの積率相関係数は次の式で定義される。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.1)$$

n はデータの総数であり、 x_i, y_i はそれぞれのデータ点、 $\bar{x}, \bar{y}$ はそれぞれの平均値である。

§ 4.3 提案手法のアルゴリズム

4章で示した各手法を統合した提案手法全体の流れの説明を行う。データ取得から3Dグラフによるサプライチェーン構造の可視化までの流れを図4.6に示し、データ取得から相関分析までの流れを図4.7に示す。

Step 1: 産業連関表の三角化

総務省のウェブサイトから令和2年(2020年)産業連関表の取引基本表(生産者価格評価)(統合大分類表)を取得する。総務省のウェブサイトからダウンロードできる産業連関表はexcel形式であるから、csvファイル形式に変換し、データフレームに格納する。データフレームに格納された産業連関表に対して投入係数を求め、投入係数表を作成する。

作成した投入係数表には 37×37 の投入係数行列が格納されており、その行列に対して整数計画問題を解き、産業連関表の三角化を行う。産業連関表の三角化を行うことによって得られた、バイナリ変数行列と産業部門の最適な順列をそれぞれcsvファイルに保存する。

Step 2: 3Dグラフによるサプライチェーン構造の可視化

Step1で作成された産業連関表の三角化後のバイナリ変数行列を用いて、産業間のサプライチェーン構造を3Dグラフによって可視化する。グラフの作成にはThree.jsのモジュールである3D Force-Directed Graphを用いる。

産業連関表の三角化後のバイナリ変数行列から得られた産業部門間の関係をcsvファイルに格納する。3D Force-Directed Graphに産業部門間の関係の情報を送るために、作成されたcsvファイルをjsonファイル形式に変換する。作成されたjsonファイルをもとに3Dグラフを描画する。描画されたグラフはマウスをドラッグすることで回転でき、異なる視点からの観察が可能である。またホイールを回転させることでグラフの拡大、縮小を行うことができる。

Step 3: 業種別株価とドル円為替レートデータの取得

日本経済新聞のWebサイトからスクレイピングを行い、ティッカーシンボルと呼ばれる株式市場で取引される企業を識別するためのコードを取得し、業種別に異なるリストに格納する。業種別に異なるリストに格納されたティッカーシンボルを扱いやすいように、一つのデータフレームに格納する。

このとき表4.1の産業連関データと業種別株価データの統合表をもとに、特定の業種に関しては業種を統合させ、その統合した業種に対応する企業のティッカーシンボルがわかりやすいようにデータフレームに格納する。

Pythonのライブラリであるyfinanceを用いて、日経500種平均株価の構成銘柄に含まれている企業の株価データとドル円為替レートそれぞれの日足データを取得する。株価データに関しては、データフレームに格納されたティッカーシンボルを用いて、業種ごとに複数の銘柄の株価の終値を取得し、一日ごとのその業種の平均株価を計算し、データフレームに格納する。ドル円為替レートに関しては、日足データから終値を取得し、データフレームに格納する。

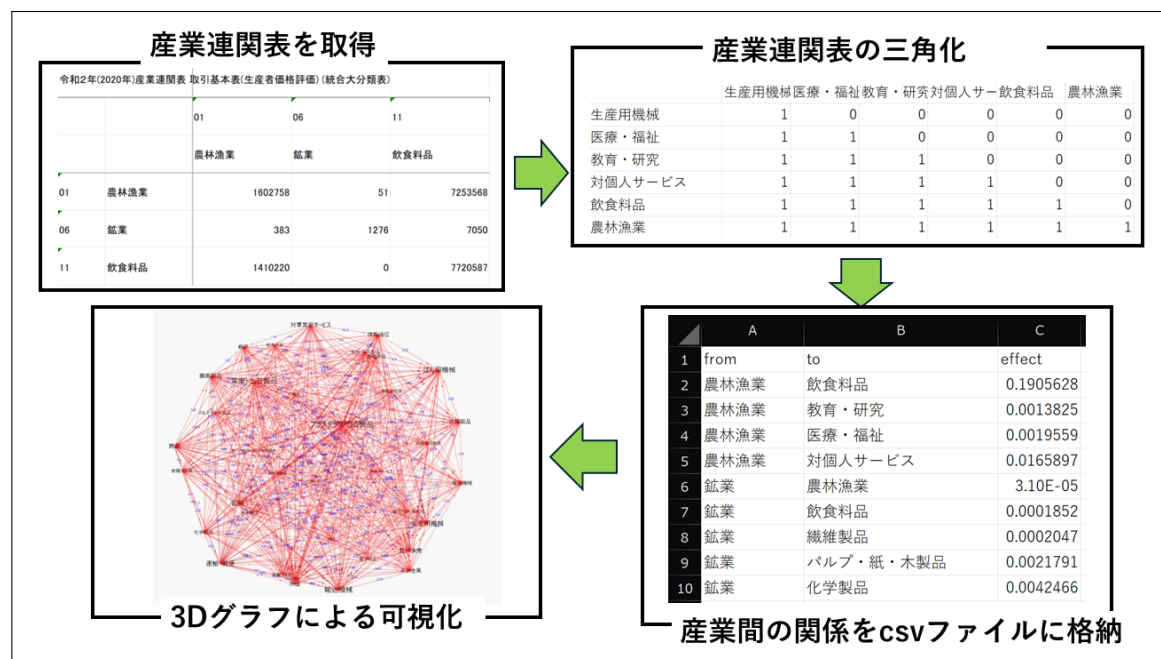


図 4.6: 3D グラフによる可視化の流れ

ドル円為替レートと日経 500 種平均株価それぞれの取引市場の営業日が異なっているなどの理由により、取得できるデータの日付がドル円為替レートと業種別平均株価とで異なっているため、両方とも取得できている日付のデータを抽出し、データフレームに格納する。データフレームに格納されたドル円為替レートと業種別平均株価から、一日ごとのそれぞれのデータの終値の変動率を計算し、データフレームに格納する。

Step 4: 為替変動時の各産業への影響の算出

総務省のウェブサイトから輸入表を取得し、Step1 で取得した取引基本表を競争輸入型から非競争輸入型に変換する。変換した非競争輸入型の取引基本表から、国産品投入係数行列と輸入品投入係数行列を求め、それぞれデータフレームに格納する。

また、日本銀行のウェブサイトから企業物価指数 (2020 年基準) 輸出・輸入物価指数の契約通貨別構成比と企業向けサービス価格指数の契約通貨別構成比 (2020 年基準) を取得し、各産業の米ドル建て契約比率をデータフレームに格納する。

各産業の米ドル建て契約比率と、Step3 で求めたドル円為替レートの各日付の変動率を用いて、各日の輸出入価格の変動率を求め、データフレームに格納する。そして国産品投入係数行列、輸入品投入係数行列、各日の輸出入価格の変動率を用いて、前日と当日のドル円為替レートの変動による輸出価格変動の影響と輸入価格変動の影響をそれぞれ算出し、足し合わせたものをデータフレームに格納する。

最後に表 4.1 の産業連関データと業種別株価データの統合表をもとに、特定の産業部門に関しては算出した結果を足し合わせ、産業部門の統合または削除を行い、新たなデータフレームに格納する。

Step 5: 相関分析と可視化

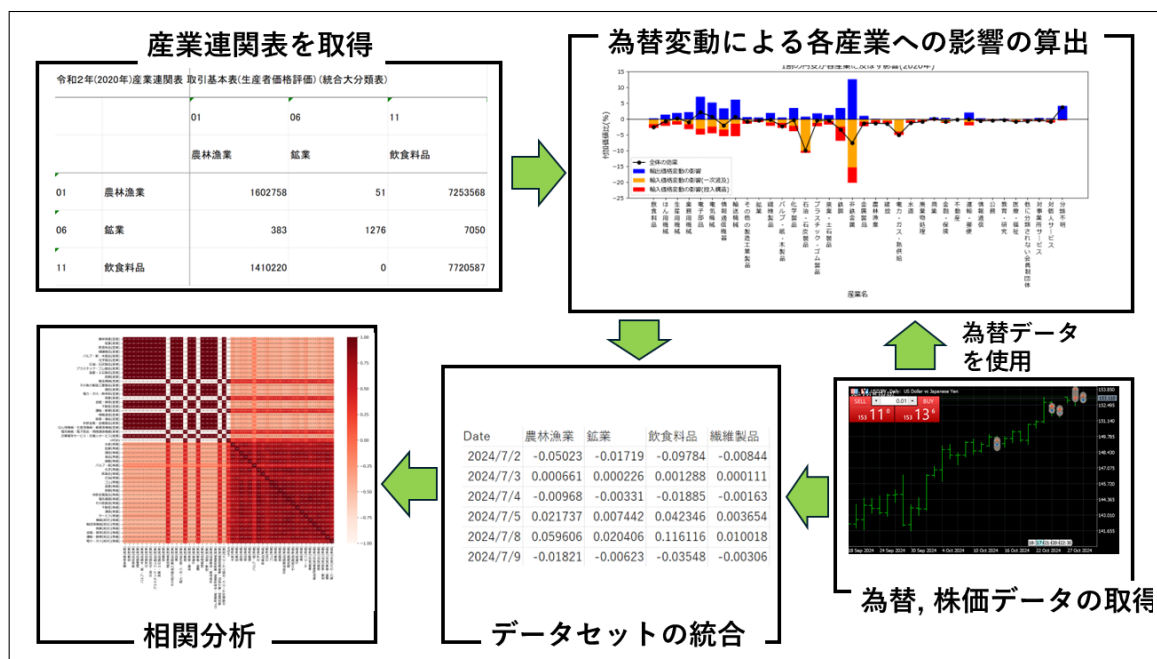


図 4.7: 相関分析の流れ

Step3で作成した一日ごとのドル円為替レートと業種別株価データそれぞれの終値の変動率が格納されたデータフレームと, Step4で作成した産業連関表による為替変動時の各産業への影響の算出結果を一つのデータフレームにまとめて格納する. ピアソンの積率相関係数を用いて, 産業連関表による為替変動時の各産業への影響の算出結果と業種別株価, ドル円為替レートそれぞれとの相関を求める. そして求めた相関行列に対してヒートマップによる可視化を行い, 画像ファイルとして保存した.

ヒートマップの作成には, Python のデータ可視化ライブラリである Seaborn を用いる. Seaborn は, 特に統計データの可視化に特化していて, データフレーム形式のデータを直接使用してプロットでき, 列名をそのまま軸ラベルとして扱うことができる.

数値実験並びに考察

§ 5.1 数値実験の概要

本章では、実際の金融経済データを用いて、4章で述べた手法で為替変動の波及効果の分析、業種別株価、ドル円為替レートとの相関分析を行い、考察を行う。また、産業連関表の三角化により抽出した、サプライチェーン構造を可視化した3Dグラフを作成し、為替変動の波及効果について、さらなる考察を行う。数値実験では、産業連関表を活用した為替変動の波及効果の分析結果と、業種別株価との相関分析の結果を述べ、システム面についての実験でグラフネットワークによる可視化の有意性について述べていく。

為替変動の波及効果の分析に関しては、1割の円安が各産業に及ぼす影響を、2015年の総務相「産業連関表」を用いて算出した結果と、2020年の総務相「産業連関表」を用いて算出した結果の比較を行う。

相関分析に関しては、2020年の総務相「産業連関表」を用いて日々のドル円為替レートの変動が各産業に及ぼす影響の算出結果と、業種別株価、ドル円為替レートとの2024年7月1日から2024年12月1日までの相関を求める。

2020年の総務相「産業連関表」を用いて日々のドル円為替レートの変動が各産業に及ぼす影響の算出結果を格納したデータセットを図5.1に、相関分析に用いる業種別株価とドル円為替レートのデータセットを図5.2に示す。

今回の実験で用いるデータは、総務省が公開している産業連関表と、日本銀行が公開している輸出・輸入物価指数、企業向けサービス価格指数と、Yahoo! ファイナンスが公開している株価と為替の時系列データを用いる。

株価時系列データでは、日経500種平均株価の構成銘柄に含まれている500企業の業種別平均株価を用いることとし、為替時系列データでは、ドル円為替レートを用いることとする。

輸出・輸入物価指数、企業向けサービス価格指数は、各産業の米ドル建て契約比率を用いることとする。2020年の産業連関表を用いて分析を行う際は、輸出・輸入物価指数は2020年基準の2023年12月時点のデータを、企業向けサービス価格指数は2020年基準の2024年3月時点のデータを用いる。2015年の産業連関表を用いて分析を行う際は、輸出・輸入物価指数は2010年基準の2015年12月時点のデータを、企業向けサービス価格指数は2015年基準の2019年3月時点のデータを用いる。

産業連関表に関しては総務省のウェブサイトから、輸出・輸入物価指数、企業向けサービス価格指数の契約通貨別構成比に関しては日本銀行のウェブサイトから手動で、株価と為替の時系列データに関してはスクレイピングやpythonのライブラリであるyfinanceを用いて、データを収集する。

	A	B	C	D	E
1	Date	農林漁業	鉱業	飲食料品	繊維製品
2	2024/7/2	-0.05023	-0.01719	-0.09784	-0.00844
3	2024/7/3	0.000661	0.000226	0.001288	0.000111
4	2024/7/4	-0.00968	-0.00331	-0.01885	-0.00163
5	2024/7/5	0.021737	0.007442	0.042346	0.003654
6	2024/7/8	0.059606	0.020406	0.116116	0.010018
7	2024/7/9	-0.01821	-0.00623	-0.03548	-0.00306

図 5.1: 日々の為替データを用いた各産業への影響値

	A	B	C	D	E
1	Date	usdjpy	水産(株価)	鉱業(株価)	建設(株価)
2	2024/7/2	0.375991	0.142441	0.536285	0.316716
3	2024/7/3	-0.00495	-0.55055	-1.5719	0.645906
4	2024/7/4	0.072447	-1.1644	0.478524	0.722101
5	2024/7/5	-0.16273	-0.96701	-0.25821	-0.61869
6	2024/7/8	-0.44621	-0.66357	7.651153	-0.57868
7	2024/7/9	0.136328	0.084798	-3.42008	0.388803

図 5.2: 相関分析に用いる為替と株価のデータセット

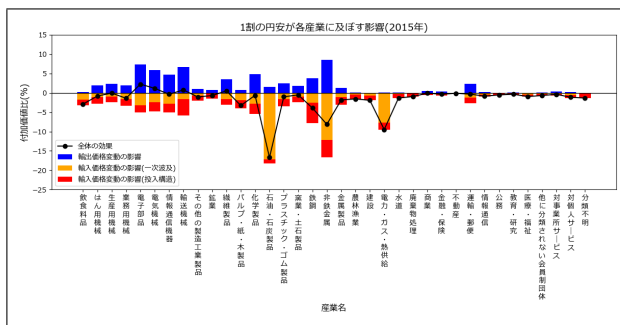


図 5.3: 2015 年の産業連関表を用いた 1 割円安時の各産業への影響

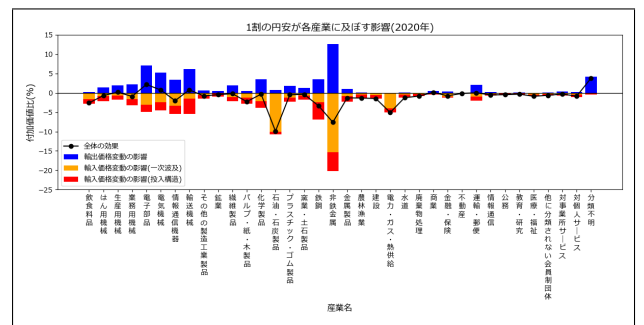


図 5.4: 2020 年の産業連関表を用いた 1 割円安時の各産業への影響

株価と為替の時系列データは、時間足を日足に設定し、終値を用いて分析を行う。

§ 5.2 実験結果と考察

為替変動の波及効果の分析を行い、1割の円安が各産業に及ぼす影響を、2015年の総務相「産業連関表」を用いて算出した結果を図 5.3 に、2020年の総務相「産業連関表」を用いて算出した結果を図 5.4 に示す。

2015年と2020年とで為替変動時の波及効果に関しては、大まかな違いは見られなかった。一方、石油・石炭製品と電力・ガス・熱供給への1割の円安による影響について、2015年と2020年で大きな違いがみられ、マイナスの影響が小さくなっている。2020年に起きた新型コロナウイルスの感染拡大により、石油の需要が激減し、原油価格が大幅に下落した [26]。これによって2020年にはマイナスの影響が小さくなったと考えられる。

2020年の総務相「産業連関表」を用いて算出した日々のドル円為替レートの変動が各産業に及ぼす影響値の2024年7月1日から2024年12月1日までの推移を図 5.5 に示す。図 5.5 を見ると、8月の始めまでは為替変動によるプラスの影響が大きく出ているが、そこから9月の終わりまでマイナスの影響とプラスの影響が交互にみられ、10月の始めと11月の始めにマイナスの影響が大きく出ていることがわかる。

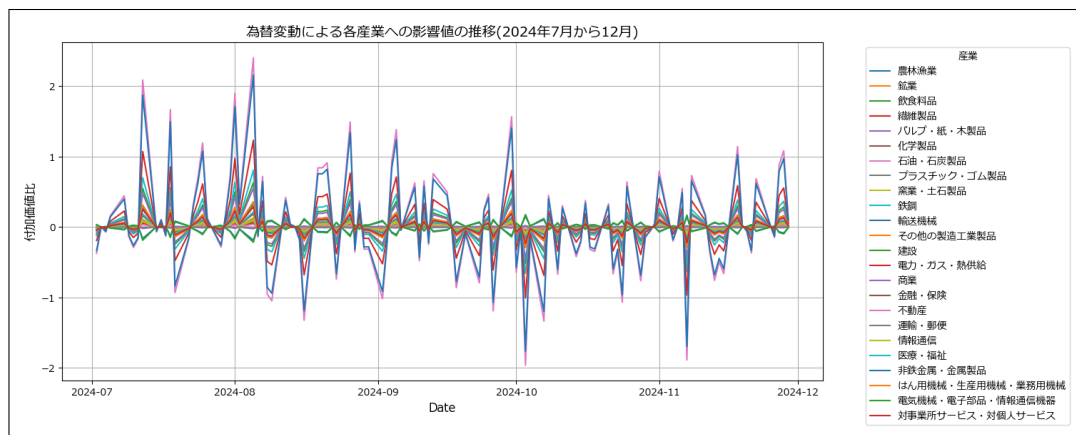


図 5.5: 為替変動による各産業への影響値の推移

2020 年の総務相「産業連関表」を用いて日々のドル円為替レートの変動が各産業に及ぼす影響の算出結果と、業種別株価、ドル円為替レートとの 2024 年 7 月 1 日から 2024 年 12 月 1 日までの相関分析を行い、出力されたヒートマップを図 5.6 に示す。

図 5.6 の左上行列は、産業連関表による為替変動時の影響の各産業部門どうしの相関を示している。これは図 5.4 の 1 割の円安が各産業に及ぼす影響の全体の効果の結果を反映していて、産業部門ごとに影響の大きさは違うが、輸入によるコスト増によつてのマイナスの影響のほうが大きい部門たちと、輸出による売り上げ増によつてのプラスの影響のほうが大きい部門たちとでそれぞれ、日々の為替の変動にあわせて同じ動きかたをする。そのため、マイナスの影響のほうが大きい部門どうしと、プラスの影響のほうが大きい部門どうしの相関係数は 1 になり、マイナスの影響のほうが大きい部門とプラスの影響のほうが大きい部門の相関係数は -1 になったと考えられる。

図 5.6 の右上 (左下) 行列は、産業連関表による為替変動時の影響の各産業部門ごとの算出結果と業種別株価との相関を示している。図 5.4 の産業連関表による為替変動時の各産業への影響は、付加価値比の変化がプラス方向であれば収益力を高め、逆にマイナス方向であれば収益力を低下させることを意味する。

そのため円安になったとき、つまりドル円為替レートが上がったとき、付加価値比の変化がプラス方向である輸送機械、商業、運輸・郵便、電気機械・電子部品・情報通信機器と、これらの産業部門に対応する輸送用機械 (統合)、商業 (統合)、運輸・郵便 (統合) の業種別平均株価との関係は正の相関であり、円安になったときこれらの企業の収益力が高まるので株価も上がったと考えられ、この結果は妥当であるといえる。しかし、そのほかの円安になったとき付加価値比の変化がマイナス方向である農林漁業や鉱業などの産業部門と、それらの産業部門に対応する業種別平均株価との関係は負の相関であり、円安になったとき収益力が低下するので株価が下がると考えられ、この結果は妥当であるとはいえない。

3.1 章で述べたように、日経平均株価の構成銘柄に輸出企業が多く含まれていることや、外国人投資家の影響などのさまざまな要因により、ドル円為替レートと日経平均株価は正の相関になるという背景があるため、このような結果になったと考えられる。

図 5.6 の右下行列は、業種別株価どうしの相関を示している。どの 2 つの異なる業種の組み合わせでも、比較的相関係数が高いことがわかった。

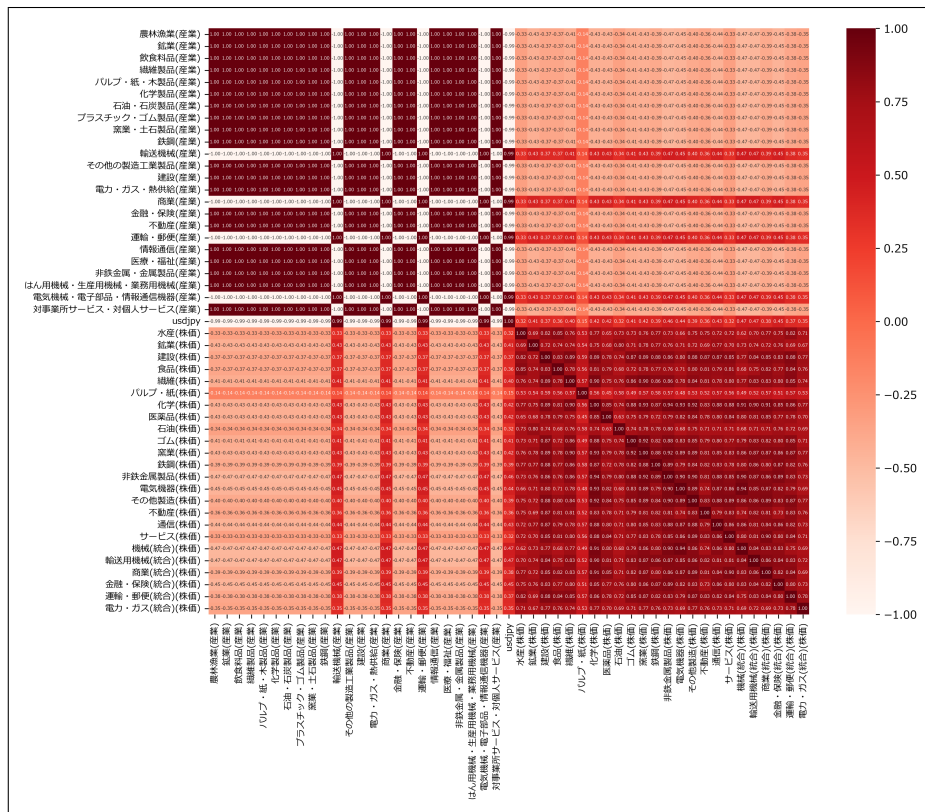


図 5.6: 出力されたヒートマップ

この理由として、投資家の心理や市場全体のリスクオン・リスクオフの動向が、業種を問わず影響を与えることがあり、株式市場全体のトレンド（強気相場や弱気相場）により、異なる業種間で相関が高くなる傾向があるということが考えられる。

図 5.6 の usdjpy の行は、ドル円為替レートと、産業連関表による為替変動時の影響の各産業部門ごとの算出結果、業種別株価それぞれとの相関を示している。産業連関表による為替変動時の影響はドル円為替レートをを用いて算出しているため、プラスの影響のほうが大きい部門との相関係数は 0.99 になり、マイナスの影響のほうが大きい部門との相関係数は -0.99 になったと考えられる。一般的にドル円為替レートと日経平均株価は正の相関になるといわれているが、どの業種の平均株価とも正の相関がみられた。

図 5.7 と図 5.8 はそれぞれ、図 5.4 の輸入価格変動の影響（一次波及要因）と輸入価格変動の影響（投入構造要因）の結果を抜き出して、左からサプライチェーンの下流順に並び変えたものである。図 5.7 を見ると、石油・石炭製品、非鉄金属、電力・ガス・熱供給は、為替変動による直接的な影響が比較的に大きいということがわかる。図 5.8 を見ると、非鉄金属、鉄鋼、輸送機械は、為替変動による産業間の取引を通じた間接的な影響が比較的に大きいということがわかる。この理由として、非鉄金属、鉄鋼、輸送機械は、それぞれのサプライチェーンの上流にいる、為替変動による直接的な影響が大きい部門の製品やサービスを投入していることが考えられる。

産業連関表の三角化により抽出した、サプライチェーン構造を可視化した 3D グラフの拡大図を図 5.9 に示す。図 5.9 を見ると、為替変動による直接的な影響が大きい部門である石

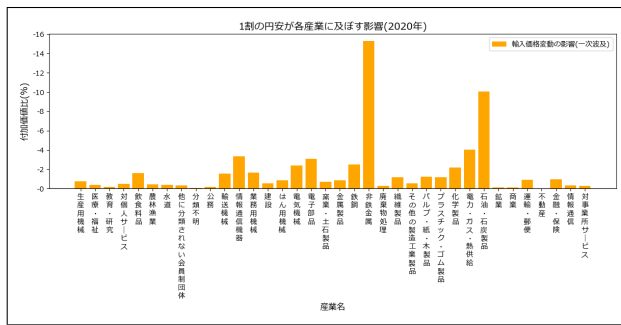


図 5.7: 輸入価格変動の影響 (一次波及要因)

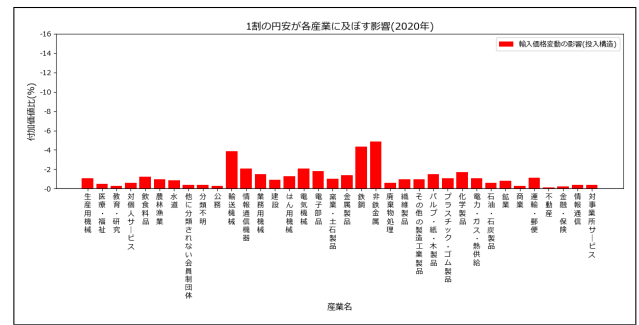


図 5.8: 輸入価格変動の影響 (投入構造要因)

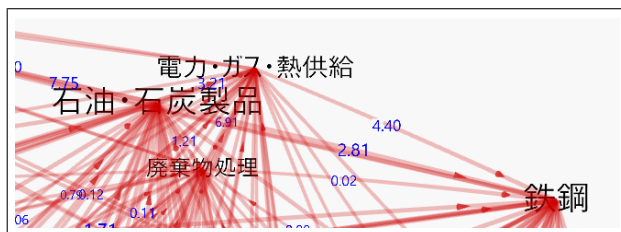


図 5.9: 拡大した 3D グラフ



図 5.10: 鉄鋼の購入先の一部

油・石炭製品と電力・ガス・熱供給から、為替変動による産業間の取引を通じた間接的な影響が大きい部門である鉄鋼に矢印が伸びていることが確認できる。3D グラフの鉄鋼のノードをクリックした際に画面上に表示される、鉄鋼の購入先の一部を図 5.10 に示す。クリックした産業部門の購入先は、投入量が多い順に表示しているため、図 5.10 を見ると、鉄鋼は電力・ガス・熱供給の製品やサービスを 2 番目に多く投入していて、石油・石炭製品の製品やサービスを 3 番目に多く投入していることがわかる。

おわりに

本研究ではユーザーの複雑な経済動向の把握を支援するため、産業連関表の三角化によるサプライチェーン構造を抽出し、日本の産業構造を3Dグラフを用いて可視化するシステムを作成し、また産業連関表を活用して為替変動の波及効果の分析を行い、業種別株価、ドル円為替レートとの相関分析を行った。

産業連関表の三角化手法を用いて、日本のサプライチェーン構造を明らかにすることで、各産業がどの程度他産業に依存しているかや、どの産業が経済全体の中核を担っているかを把握することができ、特に3Dグラフを用いた可視化を行うことで、平面的な分析では見落とされがちだった複雑な相互依存関係がより理解できるようになった。また、為替変動による他の産業からの影響について、ある産業が具体的にどの産業から影響を受けているかを調べ考察を行う上でサプライチェーン構造を可視化した3Dグラフが役立った。

しかし、3Dグラフによる可視化において課題はいくつかある。サプライチェーンの上流から下流まで一連の取引の流れを一目で確認することは難しく、またある特定の産業部門名が書かれたノードを探すのに時間がかかってしまうなど、まだ実用には向かない現状にあると言えるだろう。今後はサプライチェーン構造を見やすくするために、3Dグラフの構造を球ではなく他のものに変更することや、3Dグラフの左側に表示される産業部門名と順列が書かれた表の産業部門名をクリックしたとき3Dグラフのそのノードの文字が拡大されるなどの工夫が必要である。

為替変動の波及効果の分析を行う際に、ドル円為替レートに関してはリアルタイムに近いデータを用いたが、産業連関表に関してはおよそ5年に一度作成される関係上、現在も産業連関表作成時の状況が続いているものと仮定して2020年のデータを用いた。しかし実際は技術革新やデジタル化による生産技術の進歩や生産規模の拡大など、作成当時と現在とで産業構造が大幅に変化している恐れがあるため、産業連関表に関してもリアルタイム性を考慮したデータを作成するなどの工夫が必要である。

また、為替変動が各産業に与える影響について、為替変動による各産業の輸出入価格の変動などの直接的な影響や産業間で取引を行うことで生じる間接的な影響でそれぞれ少なからずラグが存在し、為替の変動が株価に与える影響にもラグが存在すると思うので、その間のラグがそれぞれどれくらいあるのかについても今後調べる必要がある。

謝辞

本研究を遂行するにあたり，多大なご指導と終始懇切丁寧なご鞭撻を賜った富山県立大学工学部電子・情報工学科情報基盤工学講座の António Oliveira Nzinga René 講師，奥原浩之教授に深甚な謝意を表します．最後になりましたが，多大な協力をしていただいた研究室の同輩諸氏に感謝致します．

2025 年 2 月

戸田真聡

参考文献

- [1] REUTERS, “世界の為替取引高が過去最高更新、1 日平均 7.5 兆ドル=BIS”, 閲覧日 2025-02-03,
<https://jp.reuters.com/article/idUSKBN2RN00H/>
- [2] 野村証券金融工学研究センター クオンツ・ソリューション・リサーチ部 饗場 行洋, 山本 裕樹, “データサイエンスと新しい金融工学”, 2018 年 4 月
- [3] 木下大輔, “市場間データを活用した高頻度データに対するパラメータ選択と最適なストラテジー構築”, 富山県立大学学位論文, 2022 年
- [4] 橋本将司, “ドルサイクルと金利要因の関係を考える”, 国債経済金融論考, 2021 年 6 月
- [5] 総務相, “産業連関表とは”, 閲覧日 2025-02-03,
https://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/data/io/t_gaiyou.htm
- [6] 経済産業省 大臣官房 調査統計グループ 調査分析支援室, “産業連関ハンドブック”, 2022 年 3 月, 閲覧日 2025-02-03,
<https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/entyoio/result/handbook/handbook2021ver6.pdf>
- [7] 茨城県企画部統計課, “経済波及効果分析の手引き ～産業連関表の活用～”, 閲覧日 2025-02-03,
<https://www.pref.ibaraki.jp/kikaku/tokei/fukyu/tokei/betsu/sangyo/documents/bunseki-tebiki.pdf>
- [8] 総務省, “平成 27 年 (2015 年) 産業連関表-総合解説編-”, 2020 年 1 月, 閲覧日 2025-02-03.
https://www.soumu.go.jp/main_content/000680591.pdf
- [9] 兵庫県企画県民部ビジョン局統計課, “平成 27 年 (2015 年) 兵庫県産業連関表 (分析利用編)”, 2020 年 3 月, 閲覧日 2025-02-03.
<https://web.pref.hyogo.lg.jp/kk11/documents/h27io-bunseki-chapter1.pdf>
- [10] 内田陽子, “第 1 章 産業連関表からみたアジアにおける機械産業の国際競争力-日本、韓国、タイを中心に-”, DEIM Forum2018 E5-4
- [11] 情報玉手箱, “経済分析と数理工学”, 閲覧日 2025-02-03,
<https://tamatebako.i.nagoya-u.ac.jp/5592/>
- [12] 呂建軍, 時永祥三, “アジア国際産業連関表の三角化によるハイアラキー性分析”, 経済学研究. 74 (2), pp.121-145, 2007-10-30. 九州大学経済学会
- [13] Y. Kondo, “Triangulation of Input–Output Tables Based on Mixed Integer Programs for Inter-temporal and Inter-regional Comparison of Production Structures”, *Journal of Economic Structures*, Vol. 3, No. 2, 2014.
<https://doi.org/10.1186/2193-2409-3-2>

- [14] toitoifinance, TOITOI FINANCE, “ドル円と日経平均株価の相関性を徹底解明！投資戦略に活かすポイント”, 2023 年 7 月, 閲覧日 2025-02-03,
<https://toitoe-blog.com/kawasetokabuka-soukan/>
- [15] 山本将弘, “為替が動けば株価はどう動く？ 円高と日経平均株価の意外な関係とは”, 閲覧日 2025-02-03,
<https://kabumado.jp/kawase/>
- [16] 鈴木拓也, “日経平均株価とドル円の相関関係と連動する 4 つの理由”, 閲覧日 2025-02-03,
<https://fx-megabank.com/fx-basic/usdjpy-nikkei/>
- [17] 土中哲秀, “グラフネットワークと経済分析”, オペレーションズ・リサーチ 2022 年 7 月号, 2022 年 7 月
- [18] 土橋 喜, “エンゲージメントヒートマップー Moodle ログのデータマイニングによる学習傾向の可視化ー”, 情報教育シンポジウム 2020 年 12 月
- [19] 小松隆行, “教師なし学習を用いた COVID-19 新規感染者数のクラスター分析”, 北海道科学大学研究紀要, 第 50 号, 2022 年
- [20] アンドエンジニア, “Three.js とは？概要やできることを JavaScript 関連術を含めて解説”, 閲覧日 2025-02-03,
<https://and-engineer.com/articles/ZOWitBIAACMAFtEj>
- [21] 日本経済研究センター 小野寺敬, 落合勝昭, 田原健吾, “円安メリット薄れる国内産業-原発停止や海外現地生産が背景に-”, 2019 年 11 月, 閲覧日 2025-02-03,
https://www.jcer.or.jp/jcer_download_log.php?post_id=55288&file_post_id=55335
- [22] 三菱UFJ リサーチ&コンサルティング 藤田隼平, “コロナ禍の円安は日本経済にプラスに働くか？ ～国内産業の収益力が低下し、消費者負担も増加～”, 2021 年 8 月 19 日, 閲覧日 2025-02-03,
https://www.murc.jp/wp-content/uploads/2021/08/report_210819.pdf
- [23] 佐々日向子, 伊藤貫之, “ネットワークの 3 次元可視化と集合可視化の重ね書きの一手法”, DEIM Forum2018 E5-4
- [24] C. Ware and G. Franck, “Evaluating Stereo and Motion Cues for Visualizing Information Nets in Three Dimensions”, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 15, No. 2, pp. 121-140, 1996
- [25] Study channel, “Pearson の積率相関係数”, 閲覧日 2025-02-03,
<https://www.study-channel.com/2015/08/pearsons-correlation-coefficient.html>
- [26] 経済産業省 資源エネルギー庁, “新型コロナウイルスの影響はエネルギーにも？ 国際原油市場の安定化に向けた取り組み”, 2020 年 4 月, 閲覧日 2025-02-03.
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/energy_and_coronavirus.html

